



Pedro Lacerda Correia de Barros

Montagem por Interferência de Rodas Dentadas nos Veios de Redutores Industriais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professora Doutora Helena Victorovna
Guitiss Navas, Professora Auxiliar, FCT-UNL
Co-orientador: Mestre David Figueiredo Nunes Braga,
SEW- EURODRIVE Portugal

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rui Fernando Santos Pereira Martins
Vogais: Prof. Doutora Helena Vítorovna Guitiss Navas
Prof. Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado
Mestre David Figueiredo Nunes Braga



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2011

Copyright

Copyright em nome de Pedro Lacerda Correia de Barros, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A todos aqueles que de alguma forma, directa ou indirecta, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu profundo agradecimento, em especial:

À Professora Helena V. G. Navas por me ter dado a oportunidade de fazer esta dissertação e pelo oportuno e permanente apoio prestado durante a realização da mesma.

Ao Mestre David Figueiredo Nunes Braga pelo apoio prestado na elaboração da dissertação e no acompanhamento nas experiências realizadas na unidade fabril da SEW-EURODRIVE na Mealhada.

A todos os operários da SEW-EURODRIVE, na Mealhada, pela ajuda prestada durante a realização das montagens experimentais.

À Professora Rosa Maria Mendes Miranda pela disponibilidade, nomeadamente, na compreensão dos materiais envolvidos neste trabalho.

Aos meus Pais pela paciência e compreensão que demonstraram com os meus horários durante a realização deste trabalho bem como no empenho interessado e actuante com a minha formação universitária.

A toda a minha família, em especial os meus irmãos, Ricardo, Sofia e Joana pelo apoio e incentivo sempre presentes.

Aos meus “companheiros de tese” Nicolau Santos, Miguel Ferraz e Duarte Telhada quer pela companhia e pelos momentos de lazer, quer pela ajuda prestada durante todo este trabalho.

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo de toda a minha vida.

Ao João Faria pela importantíssima ajuda prestada na formatação de toda a tese.

Resumo

Existem diversos tipos de fixação entre veios e rodas dentadas. Pode-se classificar esses tipos de fixação em dois grandes grupos: fixação por forma e por atrito. Nos tipos de fixação por forma incluem-se a fixação por intermédio de chavetas, de cavaletes, veios estriados e fixações poligonais. Nos de fixação por atrito, ou seja, os que utilizam o atrito entre os componentes como meio de fixação (e não o obstáculo como acontece com os de fixação por forma) podem-se incluir 3 tipos de acoplamento entre veio e roda dentada: aperto por cone, interferência por aplicação de uma força e interferência por aquecimento/arrefecimento dos componentes. Este último foi o tema desenvolvido na presente dissertação.

A interferência ocorre quando a cota mínima do diâmetro exterior do veio é maior que a cota máxima do diâmetro interior da roda dentada. Assim a interferência num ajustamento com aperto pode-se definir como sendo a diferença de cotas do veio e do cubo da roda.

Sempre que um material é sujeito a um aquecimento/arrefecimento, ocorre a sua expansão/contracção. Assim vai-se utilizar este fenómeno característico dos materiais para se eliminar a interferência existente entre materiais e permitir o acoplamento do veio no cubo da roda. O veio vai dilatar e o cubo da roda vai contrair criando um campo de tensões equitativamente distribuído ao longo da zona de montagem. Este campo de pressões criado vai manter o veio fixo ao cubo da roda permitindo a utilização de velocidades de rotação mais elevadas relativamente a todos os outros tipos de fixação.

Nesta dissertação foi desenvolvido um procedimento de montagem e uma aplicação informática de auxílio à operação de montagem em situações de ajustes por interferência.

Palavras-chave

-Interferência por aquecimento/arrefecimento, interferência por aplicação de uma força, montagem de veios/engrenagens, ajuste por interferência, fixação por atrito.

Abstract

There are many types of coupling between shafts and gears. These types of assembly can be divided into two main groups: assemblies by clamping and by friction. In the types of assemblies by clamping it can be included, keys, pins, splined shafts and polygonal fixing. On assemblies by friction, meaning, those using the friction between the components as a means of assembly (and not the obstacle as with the clamping form) might include three types of fit between shaft and gear: cone fit, press-fit and shrink-fit. The last mentioned was the theme developed on this dissertation.

The interference fit happens when the minimum quota from the outside diameter of the shaft is greater than the maximum quota from the inside diameter of the gear. Thus, interference in a shrink fit can be defined as the difference between the dimensions of the shaft and the hub.

Whenever a material is submitted to a heating/cooling, there is an expansion / contraction. So, this phenomenon, characteristic from materials can be used to clear the interference between the two components and allow the coupling of the shaft in the hub. The shaft will expand at the same time as the hub will contract creating a stress field evenly distributed along the assembly area. This pressure field will keep the shaft fixed to the hub allowing higher speeds of rotation comparatively to all other types of couplings.

On this dissertation was developed an assembly procedure and a computer application to help in assembly operation on situations of interference-fits.

Key-words

-Shrink-fit, press-fit, shaft/gear coupling , interference-fit, assemblies by friction.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação e justificação dos objectivos da tese.....	1
1.2	Estrutura da tese	2
2	Tipos de montagem de rodas dentadas em veios.....	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Fixação por forma	5
2.2.1	Chavetas	6
2.2.2	Cavaletes	7
2.2.3	Veios estriados ou canelados.....	7
2.2.4	Fixação poligonal	8
2.3	Fixação por atrito.....	9
2.3.1	Aperto por cone	9
2.3.2	Montagem por interferência	10
2.3.2.1	Montagem por interferência por aplicação directa de uma força	11
2.3.2.2	Montagem por interferência com aquecimento/arrefecimento de componentes .	12
2.4	Outros tipos de fixação.....	13
2.4.1	Montagem por soldadura.....	13
2.4.2	Montagem por colagem.....	14
3	Montagem por interferência	15
3.1	Definição de interferência sob o ponto de vista da metrologia	15
3.2	Projecto de uma montagem por interferência.....	16
3.3	Procedimento para uma montagem por interferência.....	48
3.3.1	Procedimento da montagem	48
3.3.2	Aplicação informática de apoio à montagem (folha de cálculo).	54
3.3.2.1	Folhas de cálculo base.....	55
3.3.2.2	Folhas de cálculo interactivas.....	60

4	Parte experimental.....	69
4.1	Montagens experimentais realizadas.....	69
4.2	Análise das montagens experimentais realizadas.....	80
4.2.1	Análise da montagem experimental 1	80
4.2.2	Análise da montagem experimental 2	85
5	Conclusões.....	89
	Bibliografia.....	91
	Anexo A- Exemplos de máquinas correspondentes a cada classe de choques [22]	93
	Anexo B - Propriedades mecânicas dos materiais.....	95
	B1 - Propriedades mecânicas do aço 17CrNiMo6≈18CrNiMo7-6	95
	B2 - Propriedades mecânicas do aço 20MnV6.....	97
	B3 - Propriedades mecânicas do aço 34CrNiMo6	99
	B4 - Propriedades mecânicas do aço 42CrMo4≈42CrMo5-04	101
	B5 - Propriedades mecânicas 40CrNiMo6≈42CrNiMo6	103
	Anexo C- Característica da rugosidade média, [59].....	105

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Representação de uma chaveta [5].....	6
Figura 2.2 - Cavalete de forma recta [3]	7
Figura 2.3 - Exemplo de um acoplamento com veio e cubo de roda estriados [5].....	8
Figura 2.4 - Exemplos de fixação poligonal [4].....	8
Figura 2.5 – a) Distribuição de forças numa montagem por aperto por cone [3]. b) Ilustração de uma montagem por aperto por cone [3].	10
Figura 2.6 - Definição de interferência [12].....	11
Figura 2.7 - Montagem por interferência com aplicação directa de uma força.....	12
Figura 2.8 – a) Veio arrefecido em gelo seco; b) Roda dentada aquecida no forno lava-peças industrial.....	13
Figura 2.9 - Montagem por soldadura [19].	13
Figura 2.10 - Montagem por colagem [20].	14
Figura 3.1 - Folga máxima e mínima num ajustamento com folga [15].	15
Figura 3.2 - Interferência máxima e mínima num ajustamento com aperto [15].	16
Figura 3.3 - Ajuste incerto [15].	16
Figura 3.4 - Tipos de rodas dentadas: a) Roda dentada cilíndrica de dentes rectos b) Roda dentada cilíndrica de dentado helicoidal c) Engrenagem parafuso sem-fim d) Roda dentada cónica de dentado em espiral e) Roda dentada cónica de dentado recto [21].	17
Figura 3.5 - Transmissão de forças num par de rodas dentadas [23].	20
Figura 3.6 - Engrenagem cilíndrica de dentes direitos [21].	21
Figura 3.7 - Decomposição das forças que actuam numa roda dentada numa engrenagem [6].	21
Figura 3.8 - Dentada helicoidal como um conjunto de rodas de dentes direitos [6].	22
Figura 3.9 - Roda dentada de dentado helicoidal duplo (dentes em espinha) [6].....	23
Figura 3.10 - Decomposição das forças a actuar numa roda dentada de dentado helicoidal [6]. ...	23
Figura 3.11 - Rodas cónicas com dentes direitos [21].....	25
Figura 3.12 - Forças actuando numa roda cónica [21].	25
Figura 3.13 - Rodas dentadas cónicas com dentes em espiral [21].	27
Figura 3.14 - Cilindro de parede espessa submetido a pressão interna e externa [25].	31
Figura 3.15 - Distribuição de tensões na parede de um cilindro de parede espessa [25].	32
Figura 3.16 - Diagrama de fases de uma liga Fe-C (aço), adaptado de [28].	37
Figura 3.17 – Representação esquemática de um disco rotativo montado com aperto num veio oco [6].	43

Figura 3.18 - Folha de cálculo “ <i>Tolerâncias/Qualidade</i> ”.	56
Figura 3.19 - Folha de cálculo “ <i>Desvios fundamentais para veios</i> ” (posições a a h).	57
Figura 3.20 - Folha de cálculo “ <i>Desvios fundamentais para veios</i> ” (posições j5 j6 a zc).	57
Figura 3.21 - Folha de cálculo “ <i>Desvios fundamentais para furos</i> ” (posições A a H).	58
Figura 3.22 - Folha de cálculo “ <i>Desvios fundamentais para furos</i> ” (posições J5 J6 a ZC).	58
Figura 3.23 - Folha de cálculo “ <i>Propriedades dos materiais</i> ”.	59
Figura 3.24 - Folha de cálculo “ <i>Entrada de dados</i> ”.	61
Figura 3.25 - Escolha do ajuste e tolerância.	62
Figura 3.26 – Introdução de dados em caso de desconhecimento do ajustamento.	62
Figura 3.27 - Tipo de montagem.	63
Figura 3.28 - Escolha do material da roda/veio.	63
Figura 3.29 - Dimensões restantes a introduzir referentes à montagem.	64
Figura 3.30 - Tensões numa dada secção do raio/roda dentada.	64
Figura 3.31 - Informação relativa à viabilidade da montagem.	65
Figura 3.32 - Folha de cálculo “ <i>Características da montagem</i> ”.	65
Figura 3.33 – Valores da interferência/folga máxima e mínima.	66
Figura 3.34 – Dados da montagem.	66
Figura 3.35 - Folha de cálculo “ <i>Percentagens de contracção e expansão/Velocidade crítica</i> ”....	67
Figura 3.36 - Folha de cálculo “ <i>Tensões na montagem</i> ”.	68
Figura 3.37 - Folha de cálculo “ <i>Temperaturas de arrefecimento e aquecimento</i> ”.	69
Figura 3.38 – Temperatura possível de atingir para arrefecimento do veio.	69
Figura 3.39 – Procedimento e temperatura de aquecimento do cubo da roda.	70
Figura 4.1 – a) Câmara de imagens térmicas Fluke Ti20 [36]; b) Termómetro de infravermelhos Fluke 65 [37].	69
Figura 4.2 - Veio em gelo seco.	70
Figura 4.3 - Veio pronto a ser transportado.	71
Figura 4.4 - Montagem do veio na roda	72
Figura 4.5 - Aspecto final da montagem.	72
Figura 4.6 – a) Rótulo da caixa de gelo seco; b) Caixa de arrefecimento do veio.	74
Figura 4.7 - Roda dentada à saída da máquina de lavar-peças industrial.	74
Figura 4.8 - Imagem termográfica (com escala de temperaturas) da roda dentada à saída da máquina de lavar-peças industrial.	75
Figura 4.9 - Imagem termográfica (com escala de temperaturas) da roda dentada no local da montagem.	75

Figura 4.10 - a) Limpeza do gelo seco sobre o veio; b) Medição da temperatura do veio com o auxílio de um termómetro de infravermelhos.	76
Figura 4.11 - Imagem termográfica (com escala de temperaturas) da roda dentada e do veio instantes antes do acoplamento.	77
Figura 4.12 - a) Centragem do veio com o cubo da roda; b) Montagem do veio na roda dentada.	77
Figura 4.13 – Acoplamento restante com o auxílio de uma prensa.	78
Figura 4.14 - Sequência de imagens de perspectivas ampliadas da montagem	78
Figura 4.15 - Montagem finalizada.	79
Figura 4.16 - Folha de cálculo “ <i>Entrada de dados</i> ” para a montagem experimental 1.	80
Figura 4.17 - Folha de cálculo “ <i>Características da montagem</i> ” para a montagem experimental 1.	81
Figura 4.18 - Folha de cálculo “ <i>Tensões na montagem</i> ” para a montagem experimental 1.	82
Figura 4.19 - Folha de cálculo “ <i>Percentagens de contracção e expansão/Velocidade crítica</i> ” para a montagem experimental 1.	83
Figura 4.20 - Folha de cálculo “ <i>Temperaturas de arrefecimento e aquecimento</i> ” para a montagem experimental 1.	83
Figura 4.21 - Folha de cálculo “ <i>Entrada de dados</i> ” para a montagem experimental 2.	85
Figura 4.22 - Folha de cálculo “ <i>Características da montagem</i> ” para a montagem experimental 2.	86
Figura 4.23 - Folha de cálculo “ <i>Tensões na montagem</i> ” para a montagem experimental 2.	86
Figura 4.24 - Folha de cálculo “ <i>Percentagens de contracção e expansão/Velocidade crítica</i> ” para a montagem experimental 2.	87
Figura 4.25 - Folha de cálculo “ <i>Temperaturas de arrefecimento e aquecimento</i> ” para a montagem experimental 2.	88

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Coeficientes de segurança [22]	19
Tabela 3.2 - Composição química do aço 17CrNiMo6~18CrNiMo7-6 [30].	49
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do aço 17CrNiMo6~18CrNiMo7-6 [31].	50
Tabela 3.4 - Composição química do aço 20MnV6 [30].	50
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas do aço 20MnV6 [32].	50
Tabela 3.6 - Composição química do aço 34CrNiMo6 [30].	51
Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas do aço 34CrNiMo6 [33].	51
Tabela 3.8- Composição química do aço 42CrMo4~42CrMo5-04 [30].	51
Tabela 3.9 - Propriedades mecânicas do aço 42CrMo4~42CrMo5-04 [34].	51
Tabela 3.10 - Composição química do aço 42CrNiMo6~40CrNiMo6 [30].	52
Tabela 3.11 - Propriedades mecânicas do aço 42CrNiMo6~40CrNiMo6 [35].	52
Tabela 3.12 - Equipamentos de aquecimento e arrefecimento	53
Tabela 4.1 – Especificações dos termómetros utilizados [38] [39].	70
Tabela 4.2 – Resumo das características da montagem (caso prático 1).	73
Tabela 4.3 – Resumo das características da montagem (caso prático 2).	79

Nomenclatura

Nomenclatura Romana

A	Constante a determinar em função das condições de fronteira [-]
B	Constante a determinar em função das condições de fronteira [-]
d_a	Diâmetro de interferência [m]
$d_{cubo\ da\ roda}$	Diâmetro interior do cubo da roda [m]
d_{roda}	Diâmetro primitivo da roda [m]
d_{veio}	Diâmetro exterior do veio [m]
E	Módulo de elasticidade longitudinal [Pa]
$E_{roda\ dentada}$	Módulo de elasticidade longitudinal da roda dentada [Pa]
E_{veio}	Módulo de elasticidade longitudinal do veio [Pa]
F	Folga do ajuste [m]
F_a	Força axial [N]
$F_{máx}$	Folga máxima do ajuste [m]
F_{min}	Folga mínima do ajuste [m]
F_r	Força radial [N]
F_t	Força tangencial nos dentes [N]
F_T	Força total [N]
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
G	Módulo de elasticidade transversal [Pa]
i	Relação de transmissão [-]
I	Interferência do ajuste [m]
$I_{máx}$	Interferência máxima do ajuste [m]
I_{min}	Interferência mínima do ajuste [m]
L	Comprimento da montagem [m]
m_{roda}	Módulo da engrenagem [m]
M_R	Momento de rotação [N.m]
M_T	Momento de rotação transmissível sem escorregamento [N.m]
n_s	Coeficiente de segurança [-]
P	Potência transmitida [W]
p_a	Pressão de aperto [Pa]
p_{af}	Pressão de aperto em funcionamento [Pa]

p_{ai}	Pressão de aperto inicial [Pa]
p_e	Pressão externa do cilindro [Pa]
p_i	Pressão interna do cilindro [Pa]
r	Distância ao centro do corpo cilíndrico, do ponto onde se quer calcular [m]
r_a	Raio de interferência [m]
R_a	Rugosidade média na zona de contacto [m]
r_e	Raio externo do componente em questão [m]
r_i	Raio interno do componente em questão [m]
$r_{inicial}$	Raio inicial do componente em questão [m]
R_{roda}	Rugosidade média na roda dentada na zona de contacto com o veio [m]
R_{veio}	Rugosidade média no veio na zona de contacto com o cubo da roda [m]
$T_{aquecimento}$	Temperatura de aquecimento [°C]
$T_{arrefecimento}$	Temperatura de arrefecimento [°C]
$T_{inicial}$	Temperatura inicial [°C]
u	Deslocamento na direcção radial [m]
$u_{roda\ dentada}$	Valor absoluto do deslocamento radial do cubo da roda dentada [m]
$u_{roda\ dentada}(r_a)$	Expansão do raio interior do cubo da roda [m]
u_{total}	Deslocamento radial total [m]
u_{veio}	Valor absoluto do deslocamento radial do veio [m]
$u_{veio}(r_a)$	Expansão do raio exterior do veio [m]
W	Peso por unidade de volume [N/m^3]
Z_1	Número de dentes da roda condutora [-]
Z_2	Número de dentes da roda conduzida [-]
Z_{roda}	Número de dentes da roda dentada [-]

Nomenclatura Grega

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{m\acute{a}x}$	Tensão equivalente máxima [Pa]
$(\sigma_r)_{m\acute{a}x}$	Tensão radial máxima [Pa]
$(\sigma_r)_{m\acute{i}n}$	Tensão radial mínima [Pa]
$(\sigma_\theta)_{m\acute{a}x}$	Tensão tangencial máxima [Pa]
$(\sigma_\theta)_{m\acute{i}n}$	Tensão tangencial mínima [Pa]
α	Coefficiente de dilatação linear térmica [$^{\circ}\text{C}$]
α_n	Ângulo de pressão real [$^{\circ}$]
α_t	Ângulo de pressão aparente [$^{\circ}$]
β	Ângulo de hélice [$^{\circ}$]
β_{espiral}	Ângulo de espiral [$^{\circ}$]
$\gamma_{r\theta}$	Distorção [-]
δ	Interferência diametral [m]
δ_1	Ângulo do cone primitivo da roda condutora [$^{\circ}$]
δ_2	Ângulo do cone primitivo da roda conduzida [$^{\circ}$]
δ_i	Ângulo do cone primitivo da roda i [$^{\circ}$]
$\delta_{m\acute{a}x}$	Interferência diametral máxima [m]
$\delta_{m\acute{e}dia}$	Interferência diametral média [m]
$\delta_{m\acute{i}n}$	Interferência diametral mínima [m]
ΔT_m	Gradiente de temperaturas do material [$^{\circ}\text{C}$]
ε_r	Extensão total radial [-]
ε_θ	Extensão total tangencial [-]
μ	Coefficiente de atrito entre os materiais das peças em contacto [-]
μN	Força de atrito [N]
ν	Coefficiente de Poisson [-]
$\nu_{\text{roda dentada}}$	Coefficiente de Poisson do material da roda dentada [-]
ν_{veio}	Coefficiente de Poisson do material do veio [-]
Σ	Ângulo entre eixos [$^{\circ}$]
σ_r	Tensão radial [Pa]
σ_θ	Tensão tangencial [Pa]
$\tau_{r\theta}$	Tensão de corte [Pa]
ω	Velocidade angular [rad/s]

ω_c

Velocidade crítica de rotação [rad/s]

Siglas

AISI	American Iron and Steel Institute
ISO	International Organization for Standardization
SEW	Süddeutsche Elektromotoren Werke
UNS	Unified Numbering System
W.nr	Werkstoffkunde number

Símbolos químicos e metalográficos

C	Carbono
Cr	Crômio
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
V	Vanádio
α	Ferrite
γ	Austenite

1 Introdução

1.1 Motivação e justificação dos objectivos da tese

Os equipamentos constituintes dos diversos sistemas de produção são, normalmente, accionados por diferentes tipos de componentes motoras (motores eléctricos por exemplo). Estas fontes de potência, e de movimento rotativo, frequentemente fornecem características de velocidade acima das necessárias à sua utilização, surgindo por isso, a necessidade de aplicação de redutores de velocidade. Os redutores de engrenagens permitem, portanto, ajustar as características da velocidade da fonte de rotação com as características necessárias do sistema accionado, reduzindo a velocidade de rotação quanto seja necessário.

A velocidade de rotação é diminuída, aumentando o momento de rotação com o mínimo de perdas de potência de forma a otimizar todo o processo. Este aumento do momento de redução é conseguido através do uso de um ou múltiplos estágios de redução (engrenamentos). A transmissão por engrenagens, apresenta um rendimento elevado quando comparada com outros sistemas de transmissão mecânica [1].

Os redutores e os moto-redutores podem ser encontrados em variadas aplicações e em diversos sectores industriais como por exemplo, a indústria alimentar, a indústria automóvel, a indústria petroquímica, entre outras.

A empresa SEW-EURODRIVE PORTUGAL, quando deparada com situações de reparação de redutores, por vezes tem necessidade de fazer montagens de rodas dentadas e veios por interferência. Até então essas montagens eram realizadas em fábricas do mesmo grupo mas fora de Portugal o que conduzia a elevados tempos de reparação e maiores custos associados. Nesse sentido, surgiu o estudo desenvolvido em conjunto pelo DEMI (FCT-UNL) e a SEW-Eurodrive Portugal acerca deste processo de montagem.

Esse estudo (que foi o objectivo da presente dissertação) teve como principal meta a criação de procedimentos práticos (com sustentação científica) para a realização da operação de montagem por interferência de rodas dentadas nos veios de redutores.

1.2 Estrutura da tese

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos ao longo dos quais se distribuem as diferentes matérias tratadas.

O capítulo 1 faz uma pequena introdução ao tema da dissertação e apresenta a forma como a mesma está estruturada.

No capítulo 2 apresentam-se os diversos tipos de fixação entre veios e rodas dentadas. Este capítulo encontra-se dividido em quatro subcapítulos:

No subcapítulo 2.1 faz-se uma introdução aos tipos de fixação apresentando-se a forma como estes podem ser classificados.

No subcapítulo 2.2 abordam-se os diferentes tipos de fixação por forma (chavetas, cavaletes, veios estriados e fixação poligonal).

No subcapítulo 2.3 são descritos os diferentes tipos de fixação por atrito, com especial incidência na montagem por interferência com aquecimento/arrefecimento dos componentes (o tema da presente tese).

No subcapítulo 2.4 descrevem-se outros tipos de fixação menos comuns, como por exemplo, a colagem e a soldadura.

O capítulo 3 refere-se à montagem por interferência. Este capítulo encontra-se dividido em quatro subcapítulos:

No subcapítulo 3.1 define-se a interferência sob o ponto de vista da metrologia apresentando-se os diversos tipos de ajustes possíveis numa montagem.

No subcapítulo 3.2 elaborou-se um procedimento para um dimensionamento de uma montagem por interferência.

No subcapítulo 3.3 elaborou-se um procedimento e uma aplicação informática de ajuda à montagem.

No capítulo 4 está descrito o trabalho experimental realizado. Este encontra-se dividido em 2 subcapítulos:

No subcapítulo 4.1 descrevem-se as duas montagens experimentais realizadas.

No subcapítulo 4.2 analisam-se, com o auxílio da aplicação informática criada, as duas montagens realizadas.

Por fim, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões da presente dissertação.

2 Tipos de montagem de rodas dentadas em veios

2.1 Introdução

Existem vários tipos de montagem entre um veio e o cubo da roda.

O cubo será a parte da roda dentada onde se vai fixar o veio [2]. A união de uma roda dentada com o veio deve ser suficientemente rígida e desmontável (de modo a permitir a fácil substituição do veio ou roda dentada em caso de avaria) [3].

Dos tipos de montagem conhecidos pode-se fazer a seguinte distinção quanto ao tipo de fixação adoptada:

- Fixação por forma
- Fixação por atrito
- Outros tipos de fixação

2.2 Fixação por forma

A fixação por forma consiste no acoplamento da roda dentada no veio por semelhança de geometrias. Esta semelhança de geometrias é conseguida, no caso das chavetas e dos cavaletes, por inserção de um elemento de ligação entre o veio e a roda.

No caso dos veios estriados e da fixação poligonal, esta semelhança é atingida por uma maquinagem especial das superfícies de contacto do veio e do cubo da roda dentada. As principais vantagens deste tipo de fixação são o facto de a sua montagem/desmontagem ser fácil e normalmente económica. As desvantagens, por sua vez, são os altos custos de maquinagem das superfícies de contacto e o desgaste de ambos os componentes devido a micro movimentos existentes entre eles [4].

2.2.1 Chavetas

A fixação com chaveta é a forma mais usual de fixação dos veios e rodas permitindo a rotação de ambos conjuntamente. Este tipo de fixação é adequado para a transmissão de momentos de rotação médios/elevados [4].

As chavetas podem ser de diversos tipos em função da forma da secção. Assim, podem ser de secção rectangular ou de secção circular. As mais usadas, as chavetas de secção rectangular, podem ser definidas como sendo prismas de secção transversal rectangular podendo ou não ter uma ligeira inclinação (1:100) numa das faces (no caso das de secção variável). As chavetas são inseridas à força em escatéis feitos propositadamente para esse efeito. Esse mesmo escatel pode existir tanto no eixo como no cubo da roda ou apenas num dos dois elementos, dependendo do tipo de chaveta que se considere. Na figura representada de seguida (figura 2.1), pode-se visualizar uma chaveta esquematizada.

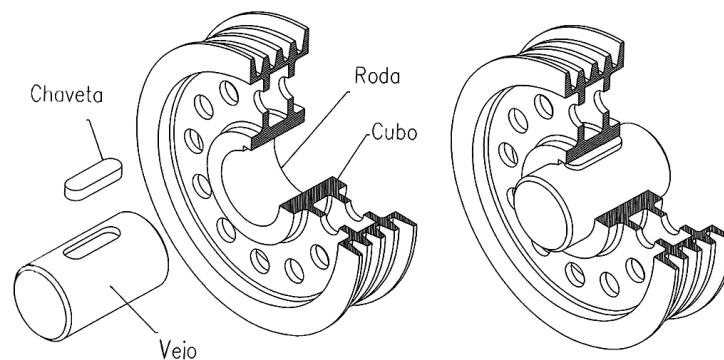


Figura 2.1 – Representação de uma chaveta [5].

As chavetas são utilizadas em aplicações em que são necessárias a montagem e desmontagem frequentes. As chavetas impedem o movimento axial relativo [6]. Existem três tipos básicos de enchavetamento de acordo com a função a cumprir:

- Enchavetamento livre: quando a chaveta está livre no escatel do veio e do cubo da roda.
- Enchavetamento normal: quando a chaveta está apertada no veio e livre no cubo da roda.
- Enchavetamento apertado: quando a chaveta está apertada no veio e no cubo da roda.

A função a cumprir pode estar relacionada, por exemplo, com a necessidade do cubo deslizar sobre o veio, com a qualidade de construção, etc [4].

As chavetas podem ser divididas em 2 grupos: de secção constante e de secção variável. Dentro do grupo de secção variável estão as chavetas de selim e as de Woodruff. Nas de secção constante incluem-se as chavetas embebidas, redondas, à face e de Barth [6].

Devido à existência de folgas na maioria das montagens, as chavetas não são adequadas para grandes velocidades, pois a distribuição irregular de massa pode causar vibrações indesejadas que por sua vez irão conduzir a um desgaste mais rápido dos componentes [3].

2.2.2 Cavaletes

Este tipo de fixação assemelha-se à montagem com chaveta. Porém, este tipo de fixação impede qualquer movimento relativo entre veio e roda dentada. Os cavaletes (figura 2.2) são prismas rectangulares podendo estes ter dois tipos de forma, rectos e de forma redonda. Os cavaletes são montados no escatel do veio, sendo este um ajustamento incerto, e também no escatel do cubo da roda, com um ajustamento com folga. A existência desta folga radial vai eliminar o esforço radial, que era indispensável no caso das chavetas. No entanto, o enchavetamento com cavaletes normalmente exige anéis elásticos de segurança, órgãos rosqueados, anéis de retenção, etc. Os cavaletes (quando comparados com as chavetas) possuem uma melhor centragem, possibilitando velocidades de rotação mais elevadas e a sua maquinação é mais económica devido à inexistência de superfícies inclinadas [3].

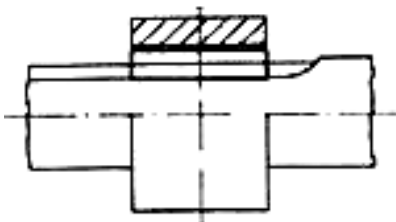


Figura 2.2 - Cavalete de forma recta [3]

2.2.3 Veios estriados ou canelados

A união por veios estriados (figura 2.3) pressupõe a abertura de estrias nas superfícies de contacto do veio e do cubo da roda. O comportamento das estrias em relação às chavetas é bem mais estável dado que as estrias fazem parte do veio e do cubo, não permitindo a sua rotação e proporcionando a transmissão das forças pela superfície total da estria. Esta característica permite atingir uma maior exactidão sua montagem, reduzindo os desalinhamentos dos veios e possibilitando a transmissão de momentos de

rotação elevados [4]. É possível distinguir 3 tipos de perfil canelado, em função do tipo de aplicação que se pretende [3]:

- Superfícies laterais rectilíneas e paralelas em relação ao eixo do escatel.
- Superfícies laterais rectilíneas e inclinadas em relação ao eixo do escatel.
- Superfícies laterais com perfil a envolvente.

Neste tipo de montagem também são permitidas fixações deslizantes, entre outras, dependendo das folgas/apertos definidos em projecto [4].

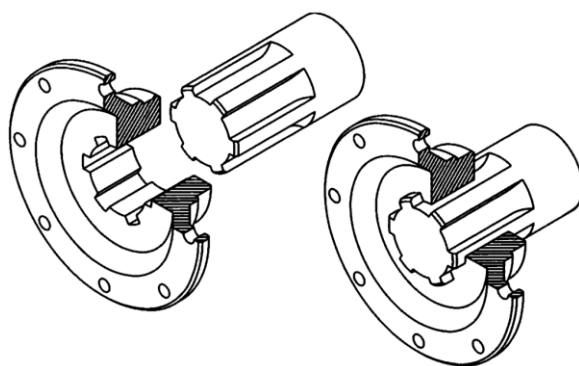


Figura 2.3 - Exemplo de um acoplamento com veio e cubo de roda estriados [5].

2.2.4 Fixação poligonal

A união poligonal (figura 2.4) consiste em superfícies de contacto entre veios e cubos de roda com uma forma poligonal pré definida que permite um encaixe mais preciso entre eles possibilitando a transmissão de momentos de rotação mais elevados (quando comparados com os anteriores tipos de fixação). Este tipo de fixação é especialmente indicado para componentes de dimensões reduzidas [4].



Figura 2.4 - Exemplos de fixação poligonal [4].

2.3 Fixação por atrito

Neste tipo de fixação, o atrito existente entre as superfícies de contacto, surge como factor impeditivo do movimento relativo de duas peças acopladas. Para o atrito se manifestar, é necessário que ambas as superfícies estejam em permanente contacto, algo que só será conseguido, através da existência de uma interferência δ , entre ambos os componentes. Um ajustamento com interferência entre um veio e uma roda significa que a cota mínima do diâmetro exterior do veio é maior que a cota máxima do diâmetro interior do cubo da roda.

Devido a esta interferência e ao permanente contacto entre ambos os componentes, inerente a este tipo de fixação, vai ocorrer uma melhor distribuição de tensões na montagem [6] (quando comparado com a fixação por forma) possibilitando a transmissão de movimentos de rotação elevados/muito elevados [7] e sem desbalanceamento a altas velocidades. Estas características fazem deste tipo de fixação, uma montagem fiável, eficiente e duradoura.

Uma montagem por atrito para se tornar estável necessita que as pressões normais existentes continuem após a montagem, mantendo ambos os elementos acoplados [3]. A desmontagem deste tipo de fixação pode-se tornar dificultada se existir desgaste/corrosão das superfícies de contacto.

As características dos materiais bem como o seu tratamento térmico e/ou químico são factores a ter em conta no dimensionamento de uma fixação por atrito.

2.3.1 Aperto por cone

A montagem com aperto por cone (figura 2.5) é normalmente utilizada em redutores para máquinas ferramenta dado se tratar de uma fixação facilmente desmontável [4].

Neste tipo de montagem, a superfície exterior do veio é cónica na zona de contacto com a roda. A roda dentada ao ser inserida vai provocar uma deformação elástica (devido à interferência) das superfícies de contacto entre ambos os elementos, acoplando-os. Entre as superfícies de contacto surge então, uma força de atrito μN , sendo esta força a responsável por manter ambas as peças acopladas. Os valores de conicidade devem ser escolhidos de acordo com o tipo de função a executar pela montagem e esforços a que mesma vai estar sujeita. A fixação por aperto de cone é condicionada pela necessidade de tolerâncias apertadas aquando da execução do cone, tornando a sua maquinação dispendiosa [3].

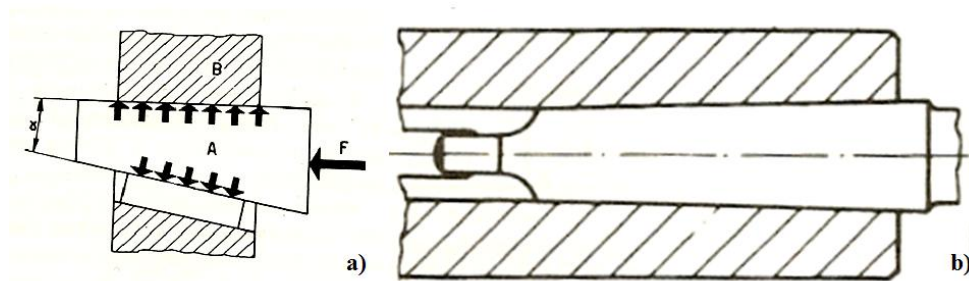


Figura 2.5 – a) Distribuição de forças numa montagem por aperto por cone [3]. b) Ilustração de uma montagem por aperto por cone [3].

2.3.2 Montagem por interferência

A montagem por interferência é uma forma eficaz de conectar duas partes mecânicas, quer para obter um estado de pré-esforço (tensão residual) ou simplesmente para conectar as duas partes de uma forma fiável e não muito dispendiosa [8].

Uma montagem por interferência, permite um contacto com aperto entre as partes mantendo portanto as duas peças juntas permanentemente. Assim, é estabelecida uma maior resistência de montagem pois é criada uma pressão radial em ambas as superfícies de contacto [9]. São montagens compactas e estéticas em aparência [10]. A capacidade de carga deste tipo de montagem depende de vários parâmetros como por exemplo: valor de interferência, dimensões físicas, propriedades do material, precisão geométrica das peças e o estado das superfícies de contacto das peças a montar [9].

Para se conseguir o encaixe do veio no cubo da roda vai ter que ocorrer uma diminuição do diâmetro exterior do veio e/ou um aumento do diâmetro interior do cubo da roda. A soma algébrica desta diminuição do diâmetro da circunferência exterior do veio com o aumento do diâmetro da circunferência interior do cubo da roda é exactamente o que se entende por interferência da montagem δ [11].

Assim, a interferência δ (figura 2.6) pode ser expressa em função do aumento do raio interno do cubo da roda $u_{roda\ dentada}$, e da diminuição do raio externo do veio u_{veio} [6]:

$$\frac{\delta}{2} = u_{roda\ dentada} + u_{veio} \quad (2.1)$$

Onde:

δ - interferência diametral (m);

$u_{roda\ dentada}$ - valor absoluto do deslocamento radial do cubo da roda dentada (m);

u_{veio} - valor absoluto do deslocamento radial do veio (m);

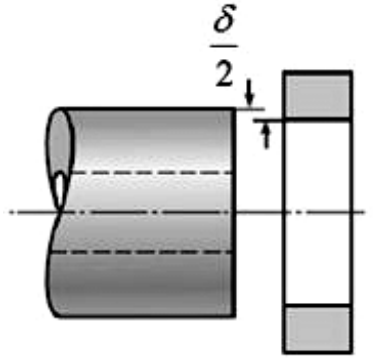


Figura 2.6 - Definição de interferência [12].

Podem ser obtidos ajustes por interferência quer por aplicação directa de uma força, quer por método térmico (aquecimento/arrefecimento do material) [13].

2.3.2.1 Montagem por interferência por aplicação directa de uma força

Neste tipo de montagem por interferência, o veio é forçado a entrar no cubo da roda através da aplicação de uma força (figura 2.7), deformando o veio, bem como o cubo da roda, até se conseguir o encaixe [14]. Ou seja, a força aplicada vai deformar os dois elementos mecânicos, até conseguir reduzir de tal maneira a interferência existente entre eles, que permita o encaixe dos mesmos.

Neste tipo de montagem, a deformação vai resultar numa diminuição da capacidade de resistência de ambos os elementos [3]. A aplicação da força normalmente é feita por uma prensa [15].



Figura 2.7 - Montagem por interferência com aplicação directa de uma força.

2.3.2.2 Montagem por interferência com aquecimento/arrefecimento de componentes

Na montagem por interferência com aquecimento/arrefecimento de componentes, aquece-se o cubo da roda de forma a se obter uma expansão do mesmo (figura 2.8b) e/ou arrefece-se o veio (contraíndo-o) de modo a reduzir a interferência existente e se conseguir o pretendido encaixe (figura 2.8a).

Neste tipo de montagem, ao contrário do método anterior, a operação é feita sem qualquer aplicação de força, ou seja, é feita livremente. Assim, não há qualquer dano na superfície do material resultante deste método de montagem [16]. Depois de montados os elementos mecânicos são deixados à temperatura ambiente até que retornem à mesma permitindo que se estabeleça um campo de pressões (que vai manter as duas peças fixas) na superfície de contacto dos dois elementos mecânicos [17].

A equação que explica este comportamento de expansão e contracção pode ser descrita pela relação [18]:

$$\frac{\delta}{2} = \alpha \cdot \Delta T_m \cdot r_{inicial} \quad (2.2)$$

Onde:

α - coeficiente de dilatação linear térmica ($^{\circ}\text{C}$)

$\Delta T_m = T_{final} - T_{inicial}$ - gradiente de temperaturas do material ($^{\circ}\text{C}$);

$r_{inicial}$ - raio inicial do componente em questão (m);

A dissertação vai se centrar neste método de montagem.

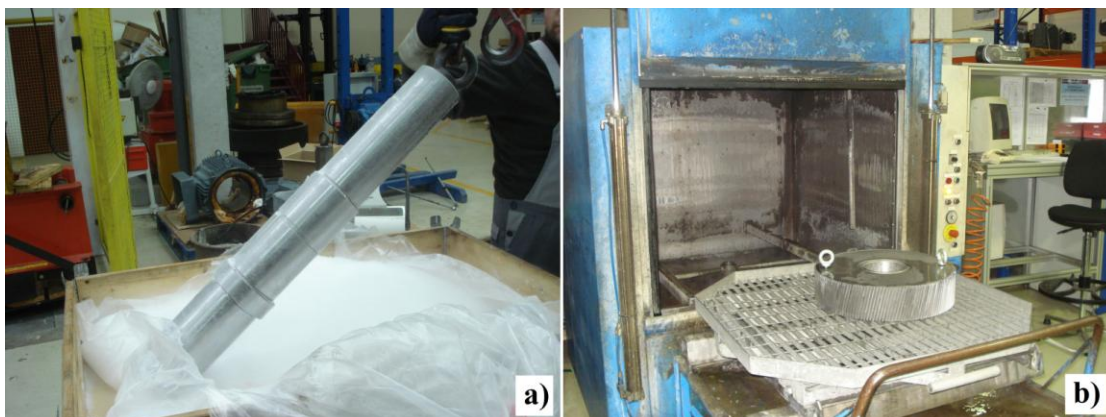


Figura 2.8 – a) Veio arrefecido em gelo seco; b) Roda dentada aquecida no forno lava-peças industrial.

2.4 Outros tipos de fixação

A título informativo pode-se ainda falar de dois outros tipos de montagem mas que não têm o mesmo relevo em termos de aplicação em conexões veio - cubo da roda que os descritos anteriormente. Isto deve-se essencialmente ao facto de serem processos que proporcionam uma união permanente entre os elementos mecânicos, dificultando ou mesmo impossibilitando a sua desmontagem, além da sua aplicação ser condicionada pelas características materiais em questão.

2.4.1 Montagem por soldadura

Na montagem por soldadura (figura 2.9) os componentes mecânicos são soldados um ao outro por acção do calor, com ou sem material de adição, de modo a permitir a continuidade física entre os dois elementos mecânicos. Assim, vai-se obter uma união rígida entre os componentes mecânicos [3].



Figura 2.9 - Montagem por soldadura [19].

2.4.2 Montagem por colagem

A colagem (figura 2.10) é a fixação de duas superfícies mediante a utilização de adesivos à base de resinas sintéticas. Estes adesivos são utilizados maioritariamente na união de estruturas pelo que podem tomar o nome de adesivos estruturais a alta resistência. A primeira indústria a fazer uso deste tipo de montagem por colagem foi a indústria aeronáutica. A aplicação de um adesivo pode-se dar por meio de prensas no caso de adesivos em filme ou por pistola de cola no caso de adesivos líquidos. Posteriormente, faz-se um aquecimento da linha de junção seguido de uma compressão durante o endurecimento a quente [3].

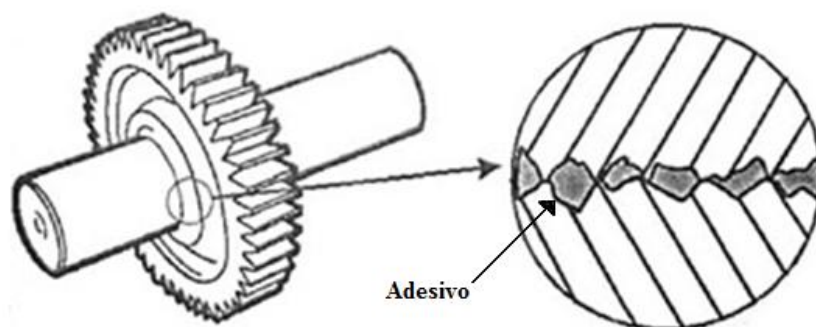


Figura 2.10 - Montagem por colagem [20].

3 Montagem por interferência

3.1 Definição de interferência sob o ponto de vista da metrologia

Um ajuste refere-se sempre ao conjunto das duas peças (veio e furo) e será caracterizado pela folga ou pela interferência existente entre as mesmas. Assim, um ajuste pode ser de três tipos:

- Ajuste com folga (F): sempre que a cota máxima do veio for menor que a cota mínima do furo, ou seja, o veio tem um diâmetro menor que o furo, entrando nele sem esforço e sem ocorrer deformação das peças.

A folga máxima ($F_{\text{máx}}$) será a diferença entre a cota máxima do furo e a cota mínima do veio. A folga mínima ($F_{\text{mín}}$) será a diferença entre a cota mínima do furo e a cota máxima do veio (figura 3.1).

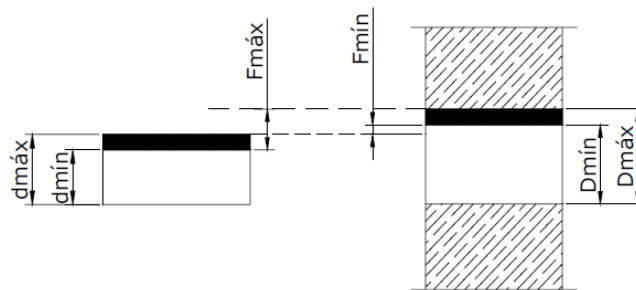


Figura 3.1 - Folga máxima e mínima num ajustamento com folga [15].

- Ajuste com interferência (I): se a cota mínima do veio for maior que a cota máxima do furo. Neste caso, o veio irá ter um diâmetro maior que o furo, entrando nele aplicando um esforço mais ou menos significativo e deformando ambas as peças, sendo por vezes esta deformação permanente. A presente dissertação vai-se centrar nesse tipo de ajustamentos.

A interferência máxima ($I_{\text{máx}}$) será a diferença entre a cota máxima do veio e a cota mínima do furo. A interferência mínima ($I_{\text{mín}}$) será a diferença entre a cota mínima do veio e a cota máxima do furo (figura 3.2).

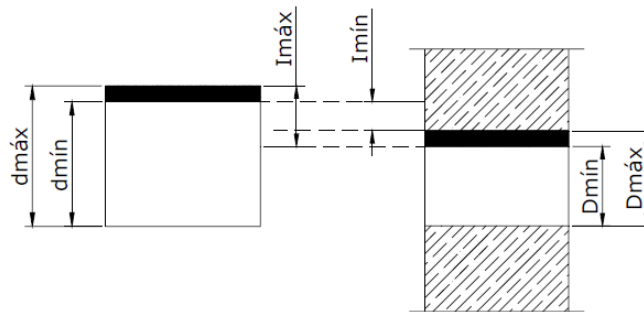


Figura 3.2 - Interferência máxima e mínima num ajustamento com aperto [15].

- Ajuste incerto: quando há sobreposição entre as zonas de tolerância do veio e do furo. Conforme as dimensões do veio e do furo, podem existir tanto uma folga como um aperto [2]. Neste caso, o veio poderá ter um diâmetro maior que o cubo da roda, existindo uma interferência entre eles, ou o veio terá um diâmetro menor que o cubo da roda, existindo uma folga (figura 3.3).

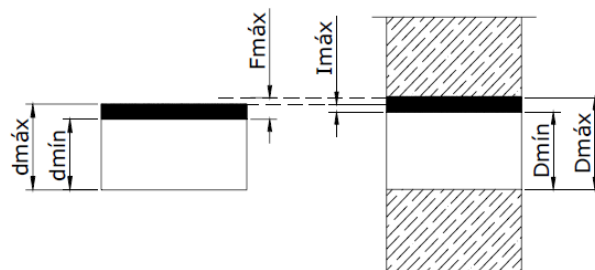


Figura 3.3 - Ajuste incerto [15].

3.2 Projecto de uma montagem por interferência

Para o correcto dimensionamento de uma montagem por interferência deve-se primeiro conhecer todos os parâmetros característicos da roda dentada, do veio e do conjunto. Após o conhecimento destes, pode-se então projectar a montagem calculando, entre outros, a interferência necessária para suportar o momento de rotação pretendido para uma dada engrenagem. Assim, é necessário haver um prévio conhecimento dos seguintes parâmetros:

- Relativamente à **engrenagem** { Posicionamento relativo dos veios, tipo de dentado (figura 3.4).
Dimensões e relação de transmissão (i).
Material da roda dentada.



Figura 3.4 - Tipos de rodas dentadas: a) Roda dentada cilíndrica de dentes rectos b) Roda dentada cilíndrica de dentado helicoidal c) Engrenagem parafuso sem-fim d) Roda dentada cónica de dentado em espiral e) Roda dentada cónica de dentado recto [21].

- Relativamente **ao veio** { Dimensões, tipo de veio (maciço ou oco).
Material do veio.
- Relativamente **ao conjunto** { Potência, velocidade de rotação, tipo de solicitação.
Coeficiente de atrito na zona de aperto e seu comprimento.

Após o conhecimento e compilação de todos estes parâmetros atrás referidos pode-se então proceder ao dimensionamento da montagem por interferência:

Passo 1- Momento de rotação, M_R :

O momento de rotação é dado pela seguinte relação [6]:

$$M_R = \frac{P}{\omega} \quad (3.1)$$

Onde:

M_R - momento de rotação (N.m);

P - potência transmitida (W);

ω - velocidade angular (rad/seg);

No caso da potência, P ser dada em cavalos vapor (cv) utiliza-se a seguinte relação conversora:

$$P(\text{watt}) = P(\text{cv}) \cdot 735 \quad (3.2)$$

No caso da velocidade de rotação, ω ser dada em rotações por minuto (r.p.m) utiliza-se a seguinte relação conversora:

$$\omega(\text{rad/s}) = \omega(\text{r.p.m}) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad (3.3)$$

Aplicando um coeficiente de segurança n_s , consoante as condições de serviço fica [6]:

$$M_R = n_s \cdot \frac{P}{\omega} \quad (3.4)$$

Onde:

n_s - coeficiente de segurança;

O coeficiente de segurança a utilizar pode ser escolhido de acordo com a Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Coeficientes de segurança [22]

Regime de funcionamento do motor	Regime de funcionamento do equipamento accionado			
Classe de choques	Uniformes	Ligeiros	Moderados	Fortes
Uniformes	1	1,25	1,5	1,75
Ligeiros	1,1	1,35	1,6	1,85
Moderados	1,25	1,5	1,75	2
Fortes	1,25	1,75	2	$\geq 2,25$

No anexo A podem ser visualizados exemplos de aplicação para cada classe de choques.

Passo 2- Força tangencial nos dentes, F_t :

A força tangencial, F_t exercida num par de engrenagens é obtida por [6]:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_R}{d_{roda}} \quad (3.5)$$

Onde:

F_t - força tangencial nos dentes (N);

d_{roda} - diâmetro primitivo da roda (m);

Na figura apresentada de seguida (Figura 3.5) pode-se visualizar as diferentes componentes da força que actuam numa engrenagem.

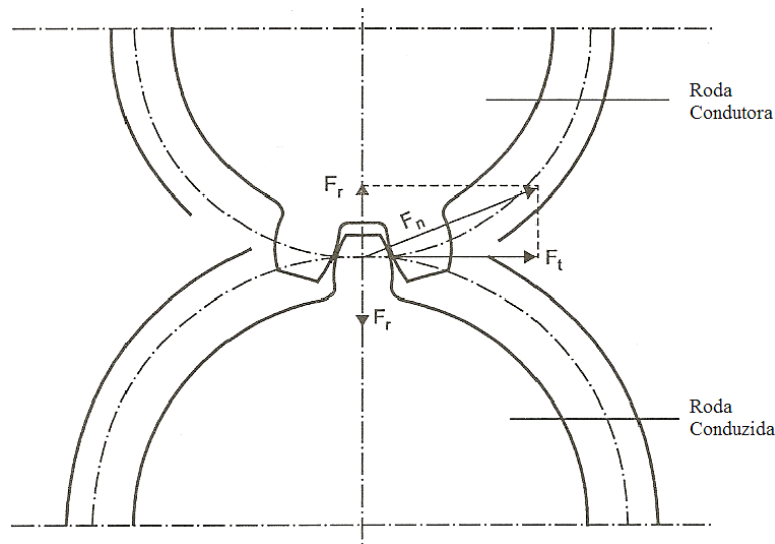


Figura 3.5 - Transmissão de forças num par de rodas dentadas [23].

O diâmetro primitivo da roda, d_{roda} pode ser obtido através da seguinte relação [12]:

$$d_{roda} = m_{roda} \cdot Z_{roda} \quad (3.6)$$

Onde:

m_{roda} - módulo da engrenagem (m);

Z_{roda} - número de dentes da roda dentada;

Passo 3- Força axial, F_a :

Dependendo do tipo de roda dentada a montar e do tipo de dentado que a mesma possuir, a força axial, F_a irá variar. Vai-se portanto definir a força axial para cada um dos diferentes tipos de engrenagens:

- Engrenagens cilíndricas de dentes direitos
- Engrenagens cilíndricas com dentes helicoidais
- Engrenagens cónicas com dentes direitos
- Engrenagens cónicas com dentes em espiral

• Engrenagens cilíndricas de dentes direitos

A utilização deste tipo de engrenagem (figura 3.6) está limitada à transmissão de movimento circular entre veios paralelos, sendo o plano médio dos seus dentes paralelo aos eixos destes veios.



Figura 3.6 - Engrenagem cilíndrica de dentes direitos [21].

A figura 3.7 apresenta o diagrama de corpo livre do pinhão podendo-se visualizar as forças decompostas segundo as direcções tangencial e radial. A força que vai ser responsável pela transmissão de potência é a componente tangencial F_t . Por sua vez, a componente radial F_r , embora não contribua para a transmissão de potência, tende a afastar as rodas entre si.

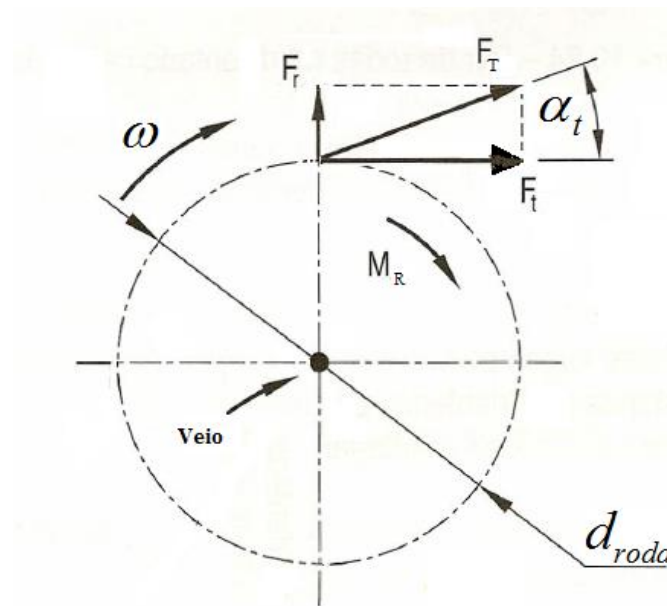


Figura 3.7 - Decomposição das forças que actuam numa roda dentada numa engrenagem [6].

Tem-se então a seguinte relação entre estas duas forças em função do ângulo de pressão, α_t [6]:

$$F_r = F_t \cdot \tan \alpha_t \quad (3.7)$$

Onde:

F_r - força radial (N);

α_t - ângulo de pressão (°);

Para este tipo de engrenagem vai-se considerar a **força axial como sendo nula** pois a sua acção é desprezável. Na realidade, esta força vai existir pois qualquer desalinhamento ou imperfeição nos dentes vai fazer com que a força axial se manifeste.

• Engrenagens cilíndricas com dentes helicoidais

Este tipo de engrenagem não só permite transmissão de movimento circular entre dois eixos paralelos como também entre dois eixos não paralelos entre si [12]. Uma roda cilíndrica com dentes helicoidais pode ser descrita como um conjunto de rodas de dentes rectos de espessura reduzida, estando cada uma delas, a rodar um pequeno ângulo em relação à anterior. Ao fazer esta espessura tender para 0, o número de rodas de dentes direitos tende para infinito obtendo-se assim a roda de dentado inclinado ou helicoidal como se poderá ver na Figura 3.8 [6].

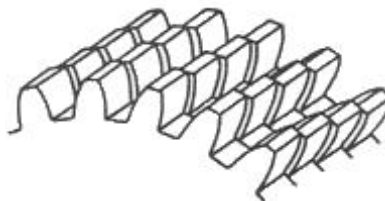


Figura 3.8 - Dentada helicoidal como um conjunto de rodas de dentes direitos [6].

Em comparação com engrenamento com dentes direitos, numa transmissão entre eixos paralelos com dentes helicoidais (figura 3.9), o escorregamento é reduzido significativamente e as pressões axiais são eliminadas [2]. Isto deve-se essencialmente ao facto do contacto inicial entre os dois dentes ser um ponto que depois evolui para uma linha disposta diagonalmente à face do dente [6]. Assim, a utilização de engrenagens helicoidais permite transmitir esforços maiores com maior uniformidade de movimento e com menos ruído, mesmo a velocidades de rotação elevadas [2].



Figura 3.9 - Roda dentada de dentado helicoidal duplo (dentes em espinha) [6].

A figura 3.10 apresenta as forças que actuam nos flancos dos dentes de uma roda helicoidal.

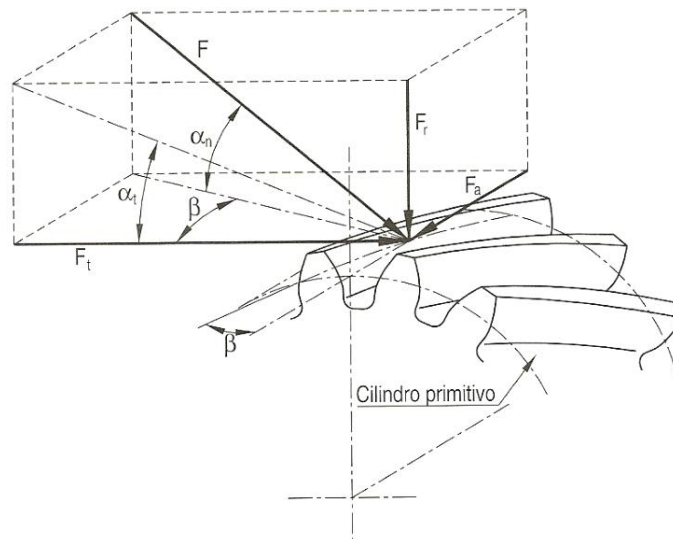


Figura 3.10 - Decomposição das forças a actuar numa roda dentada de dentado helicoidal [6].

O ponto de aplicação das forças situa-se no cilindro primitivo. Estas mesmas forças podem ser relacionadas através de [6]:

$$F_r = F_t \cdot \tan \alpha_t \quad (3.8)$$

$$F_a = F_t \cdot \tan \beta \quad (3.9)$$

$$F_T = \frac{F_t}{\cos \alpha_n \cdot \cos \beta} \quad (3.10)$$

Onde:

F_T - força total (N);

F_a - força axial (N);

α_n - ângulo de pressão real (°);

α_t - ângulo de pressão aparente (°);

β - ângulo de hélice (°);

A relação entre os ângulos de pressão α_n e α_t e o ângulo de hélice β pode ser obtida através da seguinte relação [12]:

$$\cos \beta = \frac{\tan \alpha_n}{\tan \alpha_t} \quad (3.11)$$

• Engrenagens cónicas com dentes direitos

Ao fazer a análise das forças envolvidas na transmissão por engrenagens cónicas com dentes direitos (figura 3.11), vai-se considerar que o momento de rotação produzido pela pressão de contacto ao longo do flanco do dente é aproximadamente igual ao que é produzido por uma força concentrada e aplicada no ponto médio do dente.



Figura 3.11 - Rodas cónicas com dentes direitos [21].

A figura 3.12 ilustra as forças (decompostas) actuando sobre o flanco do dente de uma roda cónica. A força radial, F_r e a força axial, F_a podem ser calculadas através da seguinte relação tendo em conta o ângulo de pressão, α_t [6]:

$$F_r = F_t \tan \alpha_t \cdot \cos \delta_i \quad (3.12)$$

$$F_a = F_t \tan \alpha_t \cdot \sin \delta_i \quad (3.13)$$

Onde:

δ_i - ângulo de cone primitivo da roda i (°);

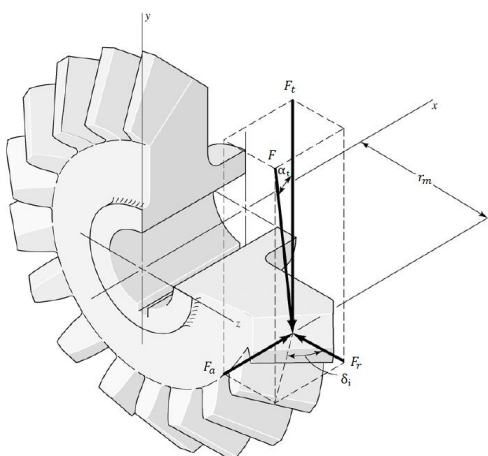


Figura 3.12 - Forças actuando numa roda cónica [21].

No caso de se estar a calcular as forças referentes à roda dentada condutora ou à conduzida, substitui-se nas expressões acima (3.12 e 3.13) o ângulo do cone primitivo δ_i pelo ângulo do cone primitivo correspondente, δ_1 ou δ_2 .

Pode-se definir as seguintes expressões para o cálculo dos ângulos do cone primitivo da roda condutora (pinhão), δ_1 e da conduzida δ_2 em função do ângulo entre os eixos, Σ [6]:

$$\Sigma = \delta_1 + \delta_2 \quad (3.14)$$

Onde:

Σ - ângulo entre eixos (°);

δ_1 - ângulo do cone primitivo da roda condutora (°);

δ_2 - ângulo do cone primitivo da roda conduzida (°);

Quando o ângulo entre eixos é de 90°, pode-se definir os ângulos dos cones primitivos em função do número de dentes da roda condutora Z_1 e conduzida Z_2 [6]:

$$\tan \delta_1 = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (3.15)$$

$$\tan \delta_2 = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3.16)$$

Onde:

Z_1 - número de dentes da roda condutora;

Z_2 - número de dentes da roda conduzida;

• Engrenagens cónicas com dentes em espiral

Uma engrenagem cónica com dentes em espiral (figura 3.13) é ideal para aplicações de alta velocidade sendo também a sua rotação mais suave e menos ruidosa. No entanto, as forças axiais a que está sujeita são muito mais elevadas.



Figura 3.13 - Rodas dentadas cónicas com dentes em espiral [21].

As forças axiais e radiais vão depender dos sentidos de rotação e do sentido da espiral, tendo-se as seguintes expressões de acordo com as condições de funcionamento:

-Quando o pinhão tem espiral à direita e sentido de rotação horário ou quando o pinhão tem espiral à esquerda e sentido de rotação anti-horário tem-se [6]:

$$F_a = \frac{F_t}{\cos \beta} \left(\tan \alpha_n \cdot \sin \delta_1 - \sin \beta_{\text{espiral}} \cdot \cos \delta_1 \right) \quad (3.17)$$

$$F_r = \frac{F_t}{\cos \beta} \left(\tan \alpha_n \cdot \cos \delta_1 + \sin \beta_{\text{espiral}} \cdot \sin \delta_1 \right) \quad (3.18)$$

-Quando o pinhão tem espiral à esquerda e sentido de rotação horário ou quando o pinhão tem espiral à direita e sentido de rotação anti-horário tem-se [6]:

$$F_a = \frac{F_t}{\cos \beta_{\text{espiral}}} \left(\tan \alpha_n \cdot \sin \delta_1 + \sin \beta_{\text{espiral}} \cdot \cos \delta_1 \right) \quad (3.19)$$

$$F_r = \frac{F_t}{\cos \beta_{\text{espiral}}} \left(\tan \alpha_n \cdot \cos \delta_1 - \sin \beta_{\text{espiral}} \cdot \sin \delta_1 \right) \quad (3.20)$$

Onde:

β_{espiral} - ângulo de espiral (°);

Passo 4- Pressão de aperto, p_a :

Numa montagem por aperto, é necessário existir um determinado momento de interferência (de valor igual ao momento de rotação, M_R) e/ou uma força axial na superfície de contacto entre os componentes da montagem. Esses dois parâmetros irão permitir à montagem manter-se unida e fazer a transmissão de movimento.

Nos passos 1 e 3 foram calculados estes dois parâmetros pelo que a pressão de aperto, p_a pode ser dada pela seguinte expressão [6]:

$$p_a = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot M_R}{\pi \cdot \mu \cdot d_a^2 \cdot L}\right)^2 + \left(\frac{F_a}{\mu \cdot \pi \cdot L \cdot d_a}\right)^2} \quad (3.21)$$

Onde:

p_a - pressão de aperto (Pa);

μ - coeficiente de atrito entre os materiais das peças em contacto;

L - comprimento da montagem (m);

d_a - diâmetro de interferência (m);

F_a - força axial (N) (calculado no passo 3);

M_R - momento de rotação (N.m) (calculado no passo 1);

No caso de apenas ser conhecida a pressão de aperto, p_a e se pretender saber qual o momento de rotação transmissível sem escorregamento, M_T ou mesmo a força axial necessária para empurrar o veio através do cubo da roda durante a montagem, F_a tem-se:

- Momento de rotação, M_T que pode ser transmitido sem ocorrer escorregamento entre os elementos da montagem [24]:

$$M_T = 2 \cdot \mu \cdot p_a \cdot L \cdot \pi \cdot r_a^2 \quad (3.22)$$

Onde:

r_a - raio de interferência (m);

M_T - momento de rotação transmissível sem escorregamento (N.m);

A força axial, F_a será [6]:

$$F_a = \mu \cdot p_a \cdot \pi \cdot L \cdot d_a \quad (3.23)$$

Passo 5- Interferência mínima necessária, δ_{\min} :

A interferência mínima necessária (para a pressão de aperto calculada no passo 4) para manter os dois elementos unidos, pode ser deduzida considerando as equações da lei de Hooke generalizada, as equações de deformação em coordenadas polares e as tensões num cilindro (problema de Lamé).

→ Equações da lei de Hooke generalizada em coordenadas polares e em função das tensões, σ_r , σ_θ e $\tau_{r\theta}$ [25]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta) \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) \quad (3.25)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\tau_{r\theta}}{G} \quad (3.26)$$

Onde:

ν - coeficiente de Poisson;

ε_r - extensão total radial;

ε_θ - extensão total tangencial;

$\gamma_{r\theta}$ - distorção;

G - módulo de elasticidade transversal (Pa);

E - módulo de elasticidade longitudinal (Pa);

σ_r - tensão radial (Pa);

σ_θ - tensão tangencial (Pa);

$\tau_{r\theta}$ - tensão de corte (Pa);

→ Equações de deformação em coordenadas polares para problemas de distribuição simétrica de extensões [25]:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (3.27)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (3.28)$$

$$\gamma_{r\theta} = 0 \quad (3.29)$$

Onde:

u - deslocamento na direcção radial (m);

r - distância ao centro do corpo cilíndrico do ponto onde se quer calcular o deslocamento radial (m);

→ Problema de Lamé (tensões num cilindro):

Este problema, representado na figura 3.14, consiste numa distribuição simétrica de tensões em relação ao eixo do cilindro. O cilindro está sujeito a uma pressão uniforme nas superfícies interna e externa.

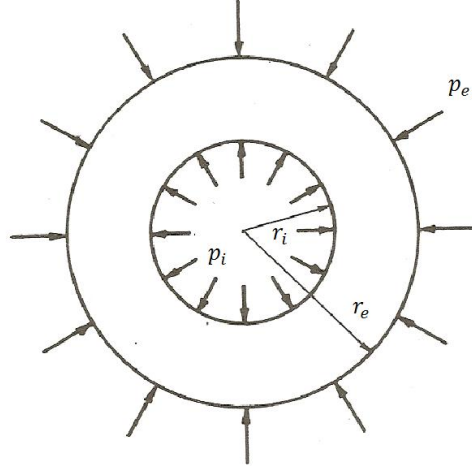


Figura 3.14 - Cilindro de parede espessa submetido a pressão interna e externa [25].

As tensões radiais, σ_r e tangenciais, σ_θ no interior do cilindro serão portanto [25]:

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 r_e^2 (p_e - p_i)}{r_e^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} + \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (3.30)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{r_i^2 r_e^2 (p_e - p_i)}{r_e^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} + \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (3.31)$$

Onde:

r_i - raio interno do cilindro (m);

r_e - raio externo do cilindro (m);

p_i - pressão interna do cilindro (Pa);

p_e - pressão externa do cilindro (Pa);

A soma de ambas as tensões calculadas acima, $\sigma_r + \sigma_\theta$, vai ser constante ao longo da espessura do cilindro. Ou seja, as tensões vão produzir uma extensão ou contracção uniforme na direcção do eixo do

cilindro sendo que as secções transversais perpendiculares a este eixo vão permanecer planas. A distribuição de tensões na parede dum cilindro de parede espessa (roda dentada) sujeito a pressão interna pode ser visualizada na figura 3.15.

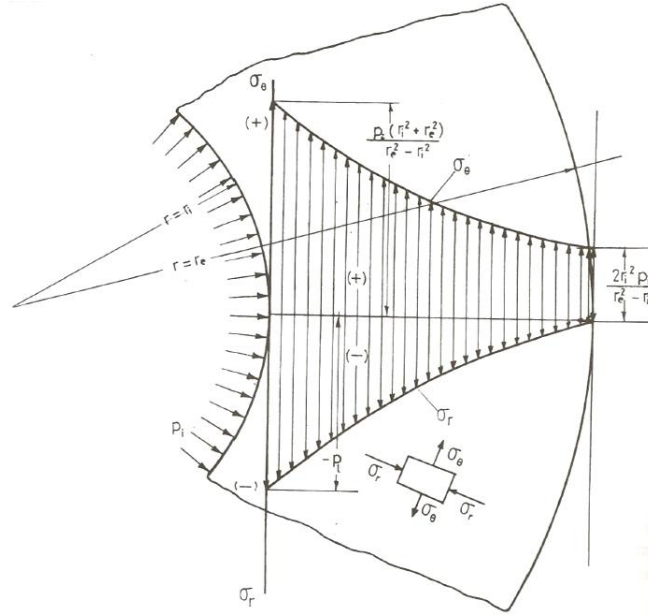


Figura 3.15 - Distribuição de tensões na parede de um cilindro de parede espessa [25].

No caso de uma montagem por interferência, a distribuição uniforme de pressão interna na zona de contacto entre os cilindros irá ser causada pelas tensões de compressão provocadas pelo aperto da roda dentada.

Assim, substituindo na equação 3.28, a equação da lei de Hooke 3.25 e considerando as tensões dadas pelas equações 3.30 e 3.31 vem [25]:

$$u = r \left(\frac{1-\nu}{E} \right) \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \frac{r_i^2 r_e^2 (p_i - p_e)}{r_e^2 - r_i^2} \quad (3.32)$$

Para determinar os deslocamentos no raio interior r_i da roda dentada e no raio exterior do veio r_e substitui-se $r_i = r_a$ ou $r_e = r_a$, respectivamente na equação acima. Estas equações são também utilizadas para calcular as tensões que surgem aquando de uma montagem por interferência. Para tal, basta igualar a soma dos deslocamentos radiais no raio exterior do veio com os do raio interior da roda dentada ao valor da interferência do ajuste de montagem donde se retira um valor de pressão radial p_i ou p_e que irá ser a pressão de aperto [25].

Aplicando a equação 3.32 à roda dentada e ao veio vai-se obter os deslocamentos radiais de cada um deles em função do raio de aperto (também denominado raio de interferência), r_a .

• Deslocamento radial da roda dentada:

Considerando $p_i = p_a$, $p_e = 0$, $r = r_a$ e $r_i = r_a$ fica [18]:

$$u_{roda\ dentada} = + \frac{p_a \cdot r_a}{E_{roda\ dentada}} \left(\frac{r_a^2 + r_e^2}{r_e^2 - r_a^2} + \nu_{roda\ dentada} \right) \quad (3.33)$$

Onde:

$E_{roda\ dentada}$ - módulo de elasticidade longitudinal da roda dentada (Pa);

$\nu_{roda\ dentada}$ - coeficiente de Poisson do material da roda dentada;

O sinal positivo desta expressão indica que o cubo da roda irá expandir, ou seja, vai haver um aumento do raio interior da roda.

• Deslocamento radial do veio:

Considerando o veio ($p_i = 0$) com $r = r_a$, $r_e = r_a$ e $p_e = p_a$ fica [18]:

$$u_{veio} = \left| - \frac{p_a \cdot r_a}{E_{veio}} \left(\frac{r_a^2 + r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} - \nu_{veio} \right) \right| \quad (3.34)$$

Onde:

E_{veio} - módulo de elasticidade longitudinal do veio (Pa);

ν_{veio} - coeficiente de Poisson do material do veio;

O sinal negativo desta expressão indica que o veio irá contrair, ou seja, o raio exterior do veio irá diminuir.

- Deslocamento radial total:

Somando as 2 equações deduzidas anteriormente, as equações 3.33 e 3.34, vai-se obter o deslocamento total a que tanto a roda dentada como o veio foram sujeitos. Tem-se então:

$$u_{total} = u_{roda\ dentada} + u_{veio} \quad (3.35)$$

Onde:

u_{total} - deslocamento radial total (m);

Assim, a interferência mínima necessária, δ_{min} (diametral) para manter ambos os elementos acoplados será [18]:

$$\frac{\delta_{min}}{2} = + \frac{P_a \cdot r_a}{E_{roda\ dentada}} \left(\frac{r_a^2 + r_e^2}{r_e^2 - r_a^2} + \nu_{roda\ dentada} \right) + \left| - \frac{P_a \cdot r_a}{E_{veio}} \left(\frac{r_a^2 + r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} - \nu_{veio} \right) \right| \quad (3.36)$$

Onde:

δ_{min} - interferência diametral mínima (m);

Passo 6- Escolha do ajuste (normalizado):

Agora que foi calculada a interferência mínima necessária deve-se escolher, recorrendo às tabelas de ajustes normalizados, um ajuste que se adeque à montagem. Para isso, deve-se consultar as tabelas fornecidas pelas normas de toleranciamento ISO [26] e [27].

Passo 7- Temperaturas de aquecimento/arrefecimento para a montagem:

Como foi anteriormente referido, a diminuição do raio exterior do veio e/ou o aumento do raio interior da roda dentada podem dever-se essencialmente a dois factores: força e/ou diferenças de temperatura. Nesta secção discute-se a influência do aumento ou diminuição da temperatura no raio exterior e interior do veio e roda dentada respectivamente.

A diferença de temperatura vai originar uma extensão/contracção térmica que embora não seja exactamente uma relação linear, pode-se assumir como linear para diferenças de temperatura na ordem dos 100°C. Assim, de acordo com esta suposição, obteve-se a seguinte equação [18]:

$$\frac{\delta}{2} = \alpha \cdot \Delta T_m \cdot r_{inicial} \quad (3.37)$$

No caso específico de um aquecimento, ΔT_m será positivo o que resultará num δ positivo indicando portanto que o deslocamento irá ocorrer para fora, ou seja, irá ocorrer uma expansão do material e consequente aumento do raio. O aquecimento é aplicado ao cubo da roda dentada, pois é nesse mesmo que se deseja a expansão.

A temperatura a que se terá de aquecer a roda dentada, de modo a que esta expanda um valor δ (em valor absoluto), permitindo a inserção do veio no cubo da roda pode ser calculada da seguinte forma:

$$T_{aquecimento} = \frac{\delta}{2 \cdot \alpha \cdot r_a} + T_{inicial} \quad (3.38)$$

Onde:

$T_{aquecimento}$ - temperatura de aquecimento (°C);

$T_{inicial}$ - temperatura inicial = temperatura ambiente (°C);

Para o arrefecimento, o raciocínio é análogo. Neste caso ΔT_m será negativo e portanto o δ também será negativo indicando que o deslocamento será para dentro, ou seja, irá ocorrer uma contracção do material e consequente diminuição do raio. O arrefecimento é por sua vez aplicado ao veio, pois pretende-se a contracção do mesmo.

Assim, a temperatura a que se terá de arrefecer o veio, de modo a que este contraia um valor δ (em valor absoluto), permitindo a inserção do veio no cubo da roda pode ser calculada da seguinte forma:

$$T_{arrefecimento} = - \left(\frac{\delta}{2 \cdot \alpha \cdot r_a} - T_{inicial} \right) \quad (3.39)$$

Onde:

$T_{arrefecimento}$ - temperatura de arrefecimento (°C);

Tanto para o aquecimento como para o arrefecimento, deve ser utilizado um valor de interferência, δ igual ou inferior ao valor médio do ajuste. Esta consideração deve-se, essencialmente, ao facto de 97,5% dos ajustamentos estarem compreendidos entre o valor mínimo e médio da classe de

interferência normalizada escolhida. Ou seja, um valor de interferência superior a este conduziria a tensões superiores às admissíveis devido às rugosidades do veio e da roda dentada na zona de contacto [6].

Durante o aquecimento/arrefecimento das peças a montar deve-se ter em conta as perdas de calor associadas. Estas perdas de calor são originadas pela duração da montagem após o arrefecimento/aquecimento do veio fazendo com que, o veio e o cubo da roda, comecem a dilatar e contrair respectivamente, não se encontrando, no momento da montagem, às temperaturas atingidas após o aquecimento/arrefecimento dos mesmos. Deve-se portanto, após o aquecimento/arrefecimento das peças, proceder à montagem o mais rápido possível de forma a minimizar estas perdas de calor que, quando elevadas, podem conduzir ao fracasso da montagem pois o veio não será inserido livremente no cubo da roda.

É necessário também que as temperaturas atingidas durante a montagem não excedam as temperaturas admissíveis de cada um dos materiais. Isto é, deve-se analisar o diagrama de fase do aço de forma a prever se o material irá mudar de estado quando atingir tais temperaturas podendo enfraquecer a sua estrutura e por conseguinte toda a montagem.

Analisando o diagrama de fases da figura 3.16 observa-se que até temperaturas na ordem dos 727 °C a estrutura estável do aço é a cúbica de corpo centrado - ferro α ou ferrite. Acima de 912 °C, a estrutura estável é a de cúbica de faces centradas – ferro γ ou austenite [28]. Pode-se assim concluir que para as temperaturas aquecimento/arrefecimento utilizadas (até 200 °C) não irá ocorrer enfraquecimento da estrutura do aço.

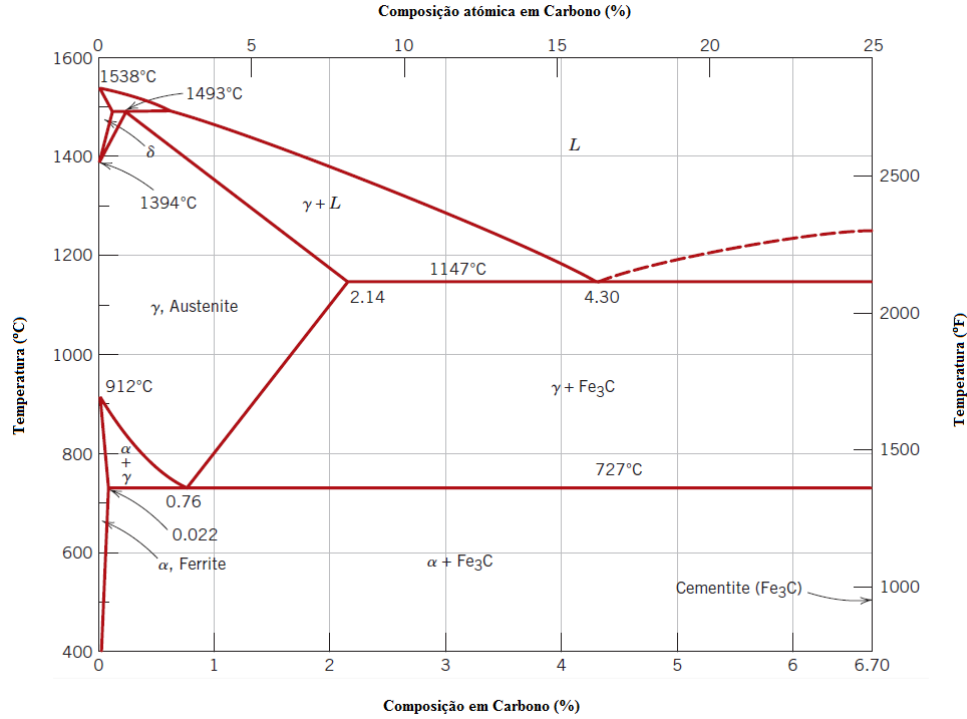


Figura 3.16 - Diagrama de fases de uma liga Fe-C (aço), adaptado de [28].

Existem diversos tipos de equipamentos e técnicas que poderão ser utilizados para o aquecimento/arrefecimento dos componentes sendo esse assunto discutido em secções à frente.

Passo 8- Pressão de aperto para interferência média:

Após se definir qual o ajuste necessário para a interferência mínima (passo 6), vai-se calcular a pressão de aperto resultante do ajuste mais provável. O ajuste mais provável será, seguindo uma distribuição normal, o ajuste médio. Assim, para a interferência média, $\delta_{\text{média}}$ correspondendo ao ajuste médio vai resultar na pressão de aperto que pode ser calculada do seguinte modo [6]:

$$p_a = \frac{\delta_{\text{média}}/2}{r_a \left(\frac{1}{E_{\text{roda dentada}}} \left(\frac{r_a^2 + r_e^2}{r_e^2 - r_a^2} + \nu_{\text{roda dentada}} \right) + \frac{1}{E_{\text{veio}}} \left(\frac{r_a^2 + r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} - \nu_{\text{veio}} \right) \right)} \quad (3.40)$$

Onde:

$\delta_{\text{média}}$ - interferência diametral média (m);

As rugosidades presentes na zona de contacto do veio com o cubo da roda têm um papel importante no dimensionamento de uma montagem por interferência devendo ser contabilizadas. Um pior acabamento das superfícies de contacto na montagem, (com as rugosidades mais elevadas) conduz, para um igual valor de interferência, a maiores pressões de aperto e portanto maiores tensões na montagem reduzindo a vida da mesma bem como a sua fiabilidade. Por outro lado, mantendo a mesma pressão de aperto e reduzindo as rugosidades dos elementos nas suas superfícies (através de melhores acabamentos), haverá uma redução da interferência necessária tornando a montagem igualmente eficaz [29].

Consultando o anexo C pode-se encontrar alguns valores de rugosidade média, R_a de acordo com a classe da rugosidade.

Assim, tendo em conta as rugosidades existentes no veio, R_{veio} e na roda dentada, R_{roda} pode-se rescrever a equação anterior (3.40) [6]:

$$P_a = \frac{\frac{\delta_{\text{média}}}{2} - R_{veio} - R_{roda}}{r_a \left(\frac{1}{E_{roda\ dentada}} \left(\frac{r_a^2 + r_e^2}{r_e^2 - r_a^2} + \nu_{roda\ dentada} \right) + \frac{1}{E_{veio}} \left(\frac{r_a^2 + r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} - \nu_{veio} \right) \right)} \quad (3.41)$$

Onde:

R_{veio} - rugosidade média no veio na zona de contacto com o cubo da roda (m);

R_{roda} - rugosidade média na roda dentada na zona de contacto com o veio (m);

A pressão de aperto gerada pela interferência da montagem δ , deverá ser suficiente para manter a roda dentada acoplada ao veio, não devendo ser excessivamente elevada de modo a não exceder as tensões admissíveis dos materiais constituintes da montagem.

Passo 9- Cálculo de tensões máximas e mínimas:

De modo a se poder fazer um estudo de como as tensões se distribuem ao longo da montagem é conveniente determinar onde as tensões radiais, tangenciais e de equivalentes, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$ serão mínimas

e máximas, comparando-as posteriormente com as tensões de cedência dos materiais constituintes. Estas não devem ser ultrapassadas, sob risco, de colapso de toda a montagem.

• **Para a roda dentada [6]:**

Tensões radiais, σ_r :

$$(\sigma_r)_{\min} = 0 \quad \text{para} \quad r = r_e \quad (3.42)$$

$$(\sigma_r)_{\max} = -p_a \quad \text{para} \quad r = r_a \quad (3.43)$$

Onde:

$(\sigma_r)_{\min}$ - tensão radial mínima (Pa);

$(\sigma_r)_{\max}$ - tensão radial máxima (Pa);

Tensões tangenciais, σ_θ :

$$(\sigma_\theta)_{\min} = \frac{2 \cdot p_a \cdot r_a^2}{r_e^2 - r_a^2} \quad \text{para} \quad r = r_e \quad (3.44)$$

$$(\sigma_\theta)_{\max} = \frac{p_a (r_a^2 + r_e^2)}{r_e^2 - r_a^2} \quad \text{para} \quad r = r_a \quad (3.45)$$

Onde:

$(\sigma_\theta)_{\min}$ - tensão tangencial mínima (Pa);

$(\sigma_\theta)_{\max}$ - tensão tangencial máxima (Pa);

Tensões equivalente, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = \frac{2 \cdot r_e^2 \cdot p_a}{r_e^2 - r_a^2} \quad \text{para} \quad r = r_a \quad (3.46)$$

Onde:

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$ - tensão equivalente máxima (Pa);

• Para o veio oco [6]:

Tensões radiais, σ_r :

$$(\sigma_r)_{\text{min}} = 0 \quad \text{para} \quad r = r_i \quad (3.47)$$

$$(\sigma_r)_{\text{máx}} = -p_a \quad \text{para} \quad r = r_a \quad (3.48)$$

Tensões tangenciais, σ_θ :

$$(\sigma_\theta)_{\text{min}} = \frac{-p_a(r_i^2 + r_a^2)}{r_a^2 - r_i^2} > p_a \quad \text{para} \quad r = r_a \quad (3.49)$$

$$(\sigma_\theta)_{\text{máx}} = -\frac{2 \cdot p_a \cdot r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} > p_a \quad \text{para} \quad r = r_i \quad (3.50)$$

Tensões equivalente, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$:

Se $p_i < p_a$ então

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}} = \frac{2 \cdot r_a^2 \cdot p_a - p_i(r_a^2 - r_i^2)}{r_a^2 - r_i^2} \quad \text{para} \quad r = r_i \quad (3.51)$$

Se $p_i > p_a$ e $p_i(r_a^2 + r_i^2) > 2 \cdot r_a^2 \cdot p_a$ então

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}} = \frac{2 \cdot r_a^2(p_i - p_a)}{r_a^2 - r_i^2} \quad \text{para} \quad r = r_i \quad (3.52)$$

Se $p_i > p_a$ e $p_i(r_a^2 + r_i^2) \leq 2 \cdot r_a^2 \cdot p_a$ então

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}} = p_i \quad \text{para} \quad r = r_i \quad (3.53)$$

• **Para veio maciço [6]:**

Tensões radiais, σ_r :

$$(\sigma_r)_{\text{min}} = (\sigma_r)_{\text{máx}} = -p_a \quad (3.54)$$

Tensões tangenciais, σ_θ :

$$(\sigma_\theta)_{\text{min}} = (\sigma_\theta)_{\text{máx}} = -p_a \quad (3.55)$$

Tensões equivalente, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = p_a \quad (3.56)$$

De forma a se determinar as cargas às quais determinado ponto da montagem está sujeito pode-se, aplicando as equações 3.30 e 3.31 para o veio e roda dentada, obter as tensões radiais, σ_r e tangenciais, σ_θ em função do raio r tendo em conta o raio de aperto r_a :

- Para a roda dentada, considerando $p_i = p_a$, $p_o = 0$, $r_i = r_a$ [6]:

$$\sigma_r = \frac{p_a \cdot r_a^2}{r_e^2 - r_a^2} \left(1 - \frac{r_e^2}{r^2} \right) \quad (3.57)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_a \cdot r_a^2}{r_e^2 - r_a^2} \left(1 + \frac{r_e^2}{r^2} \right) \quad (3.58)$$

- Para um veio oco ($p_i = 0$) com $r_e = r_a$ e $p_o = p_a$ [6]:

$$\sigma_r = \frac{p_a \cdot r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_i^2}{r^2} - 1 \right) \quad (3.59)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{p_a \cdot r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_i^2}{r^2} + 1 \right) \quad (3.60)$$

- Para um veio maciço ($p_i = 0$ e $r_i = 0$) com $r_e = r_a$ e $p_o = p_a$ [6]:

$$\sigma_r = -p_a \quad (3.61)$$

$$\sigma_\theta = -p_a \quad (3.62)$$

Passo 10- Cálculo da velocidade crítica de rotação, ω_c (com base nos deslocamentos radiais, $u(r)$):

Para se determinar a velocidade crítica de rotação do conjunto ω_c , vai-se considerar a roda dentada como sendo um disco circular de espessura constante tendo um orifício central circular, montada com interferência num veio (maciço ou oco). Na figura representada de seguida (Figura 3.17) pode-se visualizar uma representação esquemática de um disco rotativo montado com aperto num veio oco.

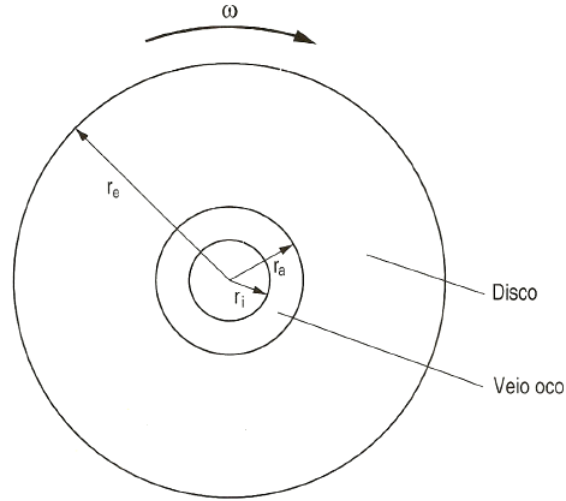


Figura 3.17 – Representação esquemática de um disco rotativo montado com aperto num veio oco [6].

Ao fazer o conjunto rodar a uma velocidade constante ω , vai ocorrer o aparecimento de tensões no interface, devido à aceleração centrífuga das massas em movimento. Estas tensões vão provocar a expansão, tanto do veio como do cubo da roda, sendo a expansão do cubo maior em relação ao veio. Quando uma certa velocidade de rotação é atingida ω_c , a diferença entre as expansões do raio interior do cubo da roda $u_{roda\ dentada}(r_a)$, e do raio exterior do veio $u_{veio}(r_a)$, iguala a interferência inicial de montagem $\frac{\delta}{2}$ deixando de existir pressão de aperto entre eles, ficando a roda dentada solta do veio. Esta velocidade, que conduz à soltura da roda dentada do veio é denominada velocidade crítica de rotação ω_c que, quando atingida, pode levar à falha de todo o conjunto [6].

$$\frac{\delta}{2} - [u_{roda\ dentada}(r_a) - u_{veio}(r_a)] = 0 \quad (3.63)$$

Onde:

$u_{roda\ dentada}(r_a)$ - expansão do raio interior do cubo da roda (m);

$u_{veio}(r_a)$ - expansão do raio exterior do veio (m);

À medida que a velocidade de rotação aumenta, a pressão de aperto inicial, p_{ai} (de igual valor à pressão de aperto, p_a calculada no passo 8) vai diminuindo, dependendo agora da velocidade de rotação do conjunto. Assim, pode-se denominar pressão de aperto em funcionamento p_{af} , à pressão de aperto

existente no interface da montagem quando o conjunto roda a uma determinada velocidade de rotação ω [6].

$$p_{af} < p_{ai} \quad (3.64)$$

Onde:

p_{af} - pressão de aperto em funcionamento (Pa);

p_{ai} - pressão de aperto inicial (Pa):

Deslocamento radial de um corpo cilíndrico à velocidade de rotação ω [6]:

$$u(r) = \frac{(1-\nu)A}{E} \cdot r + \frac{(1+\nu)B}{E} \cdot \frac{1}{r} - \frac{(1-\nu^2)}{E} \cdot \frac{W}{g} \cdot \frac{\omega^2 \cdot r^3}{8} \quad (3.65)$$

Onde:

A, B - constantes a determinar em função das condições de fronteira;

g - aceleração da gravidade (9.81 m/s^2)

W - peso por unidade de volume (N/m^3);

E - módulo de elasticidade longitudinal (Pa);

ν - coeficiente de Poisson do material;

r - raio (m);

Aplicando a expressão anterior (equação 3.65) para o veio e para a roda dentada fica:

Veio -1:

$$u_{\text{veio}}(r_a) = \frac{(1-\nu_1)A_1}{E_1} \cdot r_a + \frac{(1+\nu_1)B_1}{E_1} \cdot \frac{1}{r_a} - \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} \cdot \frac{W_1}{g} \cdot \frac{\omega^2 \cdot r_a^3}{8} \quad (3.66)$$

Roda dentada -2:

$$u_{\text{roda dentada}}(r_a) = \frac{(1-\nu_2)A_2}{E_2} \cdot r_a + \frac{(1+\nu_2)B_2}{E_2} \cdot \frac{1}{r_a} - \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \cdot \frac{W_2}{g} \cdot \frac{\omega^2 \cdot r_a^3}{8} \quad (3.67)$$

A velocidade crítica é atingida quando a diferença entre as expansões do raio interior do cubo da roda $u_{roda\ dentada}(r_a)$, e do raio exterior do veio $u_{veio}(r_a)$, iguala a interferência radial mínima inicial de montagem $\frac{\delta_{min}}{2}$ deixando de existir pressão de aperto entre eles, ficando a roda dentada solta do veio. Ou seja,

$$\frac{\delta_{min}}{2} = u_{roda\ dentada}(r_a) - u_{veio}(r_a) \quad e \quad p_{af} = 0 \quad (3.68)$$

Substituindo a expressão atrás (equação 3.68) pelos deslocamentos respectivos resulta [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{min}}{2} = & \frac{(1-\nu_2)A_2}{E_2} \cdot r_a + \frac{(1+\nu_2)B_2}{E_2} \cdot \frac{1}{r_a} - \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \cdot \frac{W_2}{g} \cdot \frac{\omega_c^2 \cdot r_a^3}{8} - \\ & - \left(\frac{(1-\nu_1)A_1}{E_1} \cdot r_a + \frac{(1+\nu_1)B_1}{E_1} \cdot \frac{1}{r_a} - \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} \cdot \frac{W_1}{g} \cdot \frac{\omega_c^2 \cdot r_a^3}{8} \right) \end{aligned} \quad (3.69)$$

Onde:

ω_c - velocidade crítica de rotação (rad/s);

Condições fronteira da montagem:

• Condições de fronteira para montagem de uma roda dentada num **veio oco** [6]:

Veio:

$$(\sigma_r)_{r=r_i} = 0 \quad (\sigma_r)_{r=r_a} = -p_{af} \quad (3.70)$$

Roda dentada:

$$(\sigma_r)_{r=r_a} = -p_{af} \quad (\sigma_r)_{r=r_e} = 0 \quad (3.71)$$

Resolvendo segundo as condições de fronteira vem:

Veio-1:

$$A_1 = \frac{B_1}{r_i^2} + C_1 \cdot r_i^2 \quad (3.72)$$

$$B_1 = \frac{-p_{af} + C_1(r_a^2 - r_i^2)}{\left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_a^2}\right)} \quad (3.73)$$

Roda dentada -2:

$$A_2 = \frac{B_2}{r_e^2} + C_2 \cdot r_e^2 \quad (3.74)$$

$$B_2 = \frac{-p_{af} + C_2(r_a^2 - r_e^2)}{\left(\frac{1}{r_e^2} - \frac{1}{r_a^2}\right)} \quad (3.75)$$

e assumindo $p_{af} = 0$ vem:

Veio-1:

$$A_1 = C_1(r_a^2 + r_i^2) \quad B_1 = C_1 \cdot r_i^2 \cdot r_a^2 \quad (3.76)$$

Roda dentada -2:

$$A_2 = C_2(r_a^2 + r_e^2) \quad B_2 = C_2 \cdot r_a^2 \cdot r_e^2 \quad (3.77)$$

Sendo $C_i = \frac{(3 + \nu_i)}{8} \cdot \frac{W_i}{g} \cdot \omega^2$ com $i = 1$ para o veio e $i = 2$ para a roda dentada;

- Condições de fronteira para montagem de uma roda dentada num **veio maciço** [6]:

$B_1 = 0$ (de modo a que as tensões no centro do veio, $r = 0$, não tendam para infinito)

Veio:

$$(\sigma_r)_{r=r_a} = -p_{af} \quad (3.78)$$

Roda dentada:

$$(\sigma_r)_{r=r_a} = -p_{af} \quad (\sigma_r)_{r=r_e} = 0 \quad (3.79)$$

Resolvendo segundo as condições de fronteira vem:

Veio-1:

$$A_1 = C_1 \cdot r_a^2 - p_{af} \quad (3.80)$$

$$B_1 = 0 \quad (3.81)$$

Roda dentada -2:

$$A_2 = \frac{B_2}{r_e^2} + C_2 \cdot r_e^2 \quad (3.82)$$

$$B_2 = \frac{-p_{af} + C_2(r_a^2 - r_e^2)}{\left(\frac{1}{r_e^2} - \frac{1}{r_a^2}\right)} \quad (3.83)$$

e assumindo $p_{af} = 0$ vem:

Veio-1:

$$A_1 = C_1 \cdot r_a^2 \quad B_1 = 0 \quad (3.84)$$

Roda dentada -2:

$$A_2 = C_2 (r_a^2 + r_e^2) \quad B_2 = C_2 \cdot r_a^2 \cdot r_e^2 \quad (3.85)$$

Sendo $C_i = \frac{(3+\nu_i)}{8} \cdot \frac{W_i}{g} \cdot \omega^2$ com $i = 1$ para o veio e $i = 2$ para a roda dentada;

Substituindo as constantes A_1 , A_2 , B_1 , B_2 (equações 3.76 e 3.77 para veio oco, equações 3.84 e 3.85 para veio maciço) na equação 3.69 e resolvendo em ordem a ω , obtém-se a velocidade crítica de rotação ω_c . Esta será a velocidade máxima de rotação que o conjunto poderá atingir sem perigo de colapso de toda a montagem.

No caso de se pretender desmontar a roda dentada do veio, utilizando somente a velocidade de rotação do conjunto, aplica-se exactamente o mesmo raciocínio aplicado anteriormente, mas desta vez irá se utilizar a interferência diametral máxima, δ_{\max} em substituição de δ_{\min} (equação 3.69) [6].

Após o cálculo de todos estes parâmetros (passo 1 a 10) pode-se então proceder à montagem do veio na roda dentada.

3.3 Procedimento para uma montagem por interferência

Nesta secção irá ser elaborado um procedimento para uma montagem por interferência, especialmente os cuidados a ter neste tipo de montagem, o material de suporte à montagem a utilizar e as temperaturas que devem ser atingidas de forma à montagem ser bem sucedida.

3.3.1 Procedimento da montagem

Passo 1- Limpeza das peças a montar.

Deve-se proceder à limpeza das peças a montar nomeadamente na zona de contacto entre elas. A limpeza é necessária dado que quaisquer impurezas presentes no interface de contacto entre o veio e o cubo da roda poderão provocar pressões de aperto mais elevadas ameaçando a fiabilidade da montagem.

Passo 2- Definição do diâmetro de aperto e sua classe de ajuste.

Através da visualização dos desenhos técnicos dos componentes é possível obter informações relativas ao diâmetro de ajuste (diâmetro de aperto), bem como às tolerâncias.

No caso de impossibilidade de obter as informações referidas por via de análise de desenhos, deve-se proceder à medição do diâmetro do veio e do diâmetro interior da roda dentada.

O conhecimento destas dimensões é de importância extrema pois será a partir dela que a interferência da montagem será calculada.

Passo 3- Material das peças a montar.

É necessário um bom conhecimento dos materiais constituintes de cada um dos componentes envolvidos na montagem (veio e roda dentada) de forma a obter as principais características mecânicas e químicas dos mesmos. Após o conhecimento destas, poder-se-á então determinar quais as condições críticas para uma determinada montagem dependendo da interferência escolhida. Os materiais estudados foram os seguintes:

• 17CrNiMo6≈18CrNiMo7-6

W.nr: 1.6587

AISI 4820

Tabela 3.2 - Composição química do aço 17CrNiMo6≈18CrNiMo7-6 [30].

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Fe
0.14 - 0.19	0.4 - 0.9	≤0.035	≤0.05	0.15 - 0.4	1.5 - 1.8	1.4 - 1.7	0.25 - 0.35	-	95.195 - 96.33

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do aço 17CrNiMo6≈18CrNiMo7-6 [31].

Massa volúmica (g/cm ³)	Coefficiente de dilatação linear térmica (10 ⁻⁶ /°C)	Coefficiente de Poisson	Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)
7.87	11.2	0.29	210

No anexo B1 pode-se consultar informações relativas às tensões de cedência e de ruptura.

• 20MnV6

W.nr: 1.5217

UNS K01907

Tabela 3.4 - Composição química do aço 20MnV6 [30].

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Fe
0.16 - 0.22	1.3 - 1.7	≤0.035	≤0.035	0.10 - 0.5	-	-	-	0.10 - 0.2	96.795 - 97.77

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas do aço 20MnV6 [32].

Massa volúmica (g/cm ³)	Coefficiente de dilatação linear térmica (10 ⁻⁶ /°C)	Coefficiente de Poisson	Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)
7.817	11.09	0.29	205

No anexo B2 pode-se consultar informações relativas às tensões de cedência e de ruptura.

• 34CrNiMo6

W.nr: 1.6582

AISI 4340

Tabela 3.6 - Composição química do aço 34CrNiMo6 [30].

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Fe
0.30 - 0.38	0.5 - 0.8	≤0.035	≤0.035	≤0.04	1.3 - 1.7	1.3 - 1.7	0.15 - 0.3	-	95.195 - 96.33

Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas do aço 34CrNiMo6 [33].

Massa volúmica (g/cm ³)	Coefficiente de dilatação linear térmica (10 ⁻⁶ /°C)	Coefficiente de Poisson	Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)
7.85	11.1	0.29	210

No anexo B3 pode-se consultar informações relativas às tensões de cedência e de ruptura.

• 42CrMo4≈42CrMo5-04

W.nr: 1.7225

AISI 4140

Tabela 3.8- Composição química do aço 42CrMo4≈42CrMo5-04 [30].

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Fe
0.38 - 0.45	0.5 - 0.8	≤0.04	≤0.04	0.3 -0.5	0.8 - 1.2	-	0.15 - 0.25	-	96.795 -97.77

Tabela 3.9 - Propriedades mecânicas do aço 42CrMo4≈42CrMo5-04 [34].

Massa volúmica (g/cm ³)	Coefficiente de dilatação linear térmica (10 ⁻⁶ /°C)	Coefficiente de Poisson	Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)
7.85	11.1	0.29	210

No anexo B4 pode-se consultar informações relativas às tensões de cedência e de ruptura.

• 42CrNiMo6≈40CrNiMo6

W.nr: 1.6565

AISI 4340

Tabela 3.10 - Composição química do aço 42CrNiMo6≈40CrNiMo6 [30].

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Fe
0.35 - 0.45	0.5 - 0.7	≤0.035	≤0.035	0.15 - 0.35	0.9 - 1.4	1.4 - 1.7	0.2 - 0.3	-	95.195 - 96.33

Tabela 3.11 - Propriedades mecânicas do aço 42CrNiMo6≈40CrNiMo6 [35].

Massa volúmica (g/cm ³)	Coefficiente de dilatação linear térmica (10 ⁻⁶ /°C)	Coefficiente de Poisson	Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)
7.85	12.3	0.29	205

No anexo B5 pode-se consultar informações relativas às tensões de cedência e de ruptura.

Passo 4- Definição da interferência considerada.

No caso de conhecimento das características do ajuste entre o veio e a roda dentada, a interferência considerada será a interferência média.

No caso de desconhecimento das características do ajuste entre o veio e a roda dentada, a interferência considerada será a calculada através das medições efectuadas pelo operário. Isto é:

$$\delta = d_{\text{veio}} - d_{\text{cubo da roda}} \quad (3.86)$$

Onde:

d_{veio} - diâmetro exterior do veio (m);

$d_{\text{cubo da roda}}$ - diâmetro interior do cubo da roda (m);

Passo 5- Definição das temperaturas de aquecimento/arrefecimento.

Após o conhecimento da interferência a considerar, deve-se conhecer quais as temperaturas de arrefecimento/aquecimento que deverão ser atingidas de forma a anular essa interferência e permitir o encaixe do veio no cubo da roda. Para calcular essas temperaturas, pode-se utilizar as equações descritas anteriormente no passo 7:

-No caso do cálculo da temperatura de aquecimento do cubo da roda deve-se utilizar a equação 3.38;

-No caso do cálculo da temperatura de arrefecimento do veio deve-se utilizar a equação 3.39.

Passo 6- Verificação e comparação das tensões atingidas e da pressão de aperto para a interferência considerada.

Após o conhecimento de todos os parâmetros atrás referidos (passos 1 a 5), pode-se então calcular as tensões máximas no veio e no cubo da roda bem como a pressão de aperto da montagem. Estas, deverão ser inferiores às tensões admissíveis do material (tensão de cedência).

Para o cálculo da pressão de aperto, p_a utiliza-se as expressões dadas no passo 8, equação 3.40 no caso de desconhecimento das rugosidades médias na zona de contacto do veio com o cubo da roda e equação 3.41 no caso de conhecimento dessas mesmas rugosidades.

Para o cálculo das tensões máximas atingidas na roda dentada e no veio deve-se utilizar as expressões referidas no passo 9:

- Roda dentada: Equações 3.42 a 3.46.

- Veio maciço: Equações 3.54 a 3.56.

- Veio oco: Equações 3.47 a 3.53.

Passo 7- Aquecimento/arrefecimento das peças a montar.

Para se atingir as temperaturas atrás calculadas pensou-se em utilizar os recursos oficiais já existentes na empresa. De seguida, na tabela 3.12, estão descritos alguns exemplos de técnicas utilizadas e temperaturas que poderão ser atingidas com as mesmas.

Tabela 3.12 - Equipamentos de aquecimento e arrefecimento

Equipamento	Temperaturas atingidas
Máquina de lavar-peças industrial	70-80°C
Gelo seco	- 79°C
Azoto líquido	-196°C

Passo 8- Transporte dos componentes para o local da montagem.

O transporte das peças para o local de montagem deve ser feito de forma rápida de modo a se minimizar as perdas de calor resultantes do contacto das peças (arrefecidas e aquecidas) com a temperatura ambiente.

No manuseamento das peças devem ser utilizadas óculos protectores, luvas e fato-macaco.

Para o transporte das peças (dependendo das suas dimensões) poderá ser utilizado uma grua ou mesmo uma empilhadora desde que o transporte seja feito de forma rápida.

Passo 9- Montagem.

O acoplamento do veio na roda dentada deve ser feito devagar de forma a evitar deformação da superfície de contacto do veio ou do cubo da roda devido a colisão forte de componentes.

Passo 10- Considerações finais.

Depois de acoplado o veio à roda dentada, ambos os componentes devem ser deixados livremente à temperatura ambiente de forma que atinjam um equilíbrio de temperaturas e uma distribuição simétrica de tensões no interface de contacto dos componentes.

A aplicação informática explicada detalhadamente de seguida poderá constituir uma ajuda valiosa no cálculo dos diversos parâmetros considerados anteriormente.

3.3.2 Aplicação informática de apoio à montagem (folha de cálculo).

Foi criada uma aplicação informática (em Excel), como forma de facilitar a obtenção de todos os dados necessários à montagem, que poderá ser utilizada pelos operários da SEW-Eurodrive caso assim o entendam. Nesta secção vai-se explicar pormenorizadamente todas as folhas de cálculo interactivas (nas

quais se podem inserir e retirar dados) bem como aquelas que servem de base à aplicação informática (as que contém dados relativos às tolerâncias e aos materiais).

A aplicação informática é constituída por 9 folhas de cálculo que podem ser organizadas da seguinte forma, dependendo da sua interacção com o utilizador:

- Folhas de cálculo base:

- *Tolerâncias/Qualidade;*
- *Desvios fundamentais para veios;*
- *Desvios fundamentais para furos;*
- *Propriedades dos materiais.*

- Folhas de cálculo interactivas:

- De introdução de dados:
 - *Entrada de dados.*
- De visualização de dados:
 - *Características da montagem;*
 - *Percentagens de contracção e expansão/Velocidade crítica;*
 - *Tensões na montagem.*
- De visualização/introdução de dados:
 - *Temperaturas de arrefecimento e aquecimento.*

3.3.2.1 Folhas de cálculo base

As folhas de cálculo base incluem as folhas relativas às tolerâncias e ajustes normalizados bem como os dados relativamente aos materiais mais utilizados neste tipo de montagem. Estas folhas, embora possam ser alteradas, (no caso de uma nova tolerância/ajuste não especificado ou mesmo no caso de

adição de um novo material) servirão de base a todos os dados que se irão obter através da aplicação informática criada. As folhas de cálculo base são as seguintes:

- Folha de cálculo “*Tolerâncias/Qualidade*”:

Na folha de cálculo representada na figura 3.18, podem ser visualizados 18 valores de tolerâncias fundamentais (IT 01, IT 0, IT 1...) variando de acordo com um determinado intervalo de dimensões nominais (até 500 mm).

Tolerâncias fundamentais ISO até 500 mm														
Grupo de dimensões em mm - valores da tabela em µm														
Qualidade	Até 1	>1 ≤3	>3 ≤6	>6 ≤10	>10≤18	>18 ≤30	>30 ≤50	>50 ≤80	>80 ≤120	>120 ≤180	>180 ≤250	>250 ≤315	>315 ≤400	>400 ≤500
IT 01	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.8	1	1.2	2	2.5	3	4
IT 0	0.5	0.5	0.6	0.6	0.8	1	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6
IT 1	0.8	0.8	1	1	1.2	1.5	1.5	2	2.5	3.5	4.5	6	7	8
IT 2	1.2	1.2	1.5	1.5	2	2.5	2.5	3	4	5	7	8	9	10
IT 3	2	2	2.5	2.5	3	4	4	5	6	8	10	12	13	15
IT 4	3	3	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
IT 5	4	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
IT 6	6	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
IT 7	10	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
IT 8	14	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
IT 9	25	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
IT 10	40	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
IT 11	60	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
IT 12	0	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
IT 13	0	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970
IT 14	0	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550
IT 15	0	400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850	2100	2300	2500
IT 16	0	600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	4000

Figura 3.18 - Folha de cálculo “*Tolerâncias/Qualidade*”.

- Folha de cálculo “Desvios fundamentais para veios”:

As posições do campo de tolerâncias para veios podem ser visualizadas nas duas figuras representadas nas figuras 3.19 e 3.20, variando de acordo com um determinado intervalo de dimensões nominais.

Desvios fundamentais para veios - Desvios superiores (µm)											
	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h
Até 1	X	X	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0
>1 ≤3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0
>3 ≤6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0
>6 ≤10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0
>10 ≤14	-290	-150	-95	X	-50	-32	X	-16	X	-6	0
>14 ≤18	-290	-150	-95	X	-60	-32	X	-16	X	-6	0
>18 ≤24	-300	-160	-110	X	-65	-40	X	-20	X	-7	0
>24 ≤30	-300	-160	-110	X	-65	-40	X	-20	X	-7	0
>30 ≤40	-310	-170	-120	X	-80	-50	X	-25	X	-9	0
>40 ≤50	-320	-180	-130	X	-80	-50	X	-25	X	-9	0
>50 ≤65	-340	-180	-140	X	-100	-60	X	-30	X	-10	0
>65 ≤80	-360	-200	-150	X	-100	-60	X	-30	X	10	0
>80 ≤100	-380	-220	-170	X	-120	-72	X	-36	X	-12	0
>100 ≤120	-410	-240	-180	X	-120	-72	X	-36	X	-12	0
>120 ≤140	-460	-260	-200	X	-145	-85	X	-43	X	-14	0
>140 ≤160	-520	-280	-210	X	-145	-85	X	-43	X	-14	0
>160 ≤180	-580	-310	-230	X	-145	-85	X	-43	X	-14	0
>180 ≤200	-660	-340	-240	X	-170	-100	X	-50	X	-15	0
>200 ≤225	-740	-380	-260	X	-170	-100	X	-50	X	-15	0
>225 ≤250	-820	-420	-280	X	-170	-100	X	-50	X	-15	0
>250 ≤280	-920	-480	-300	X	-190	-110	X	-56	X	-17	0
>280 ≤315	-1050	-540	-330	X	-190	-110	X	-56	X	-17	0
>315 ≤355	-1200	-600	-360	X	-210	-125	X	-62	X	-18	0
>355 ≤400	-1350	-680	-400	X	-210	-125	X	-62	X	-18	0
>400 ≤450	-1500	-760	-440	X	-230	-135	X	-68	X	-20	0
>450 ≤500	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figura 3.19 - Folha de cálculo “Desvios fundamentais para veios” (posições a a h).

Desvios fundamentais para veios - Desvios inferiores (µm)																			
	j5 j6	j7	j8	k4 a k7	k5 k7	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
Até 1	-2	-4	-6	0	0	2	4	6	10	14	X	18	X	20	X	26	32	40	60
>1 ≤3	-2	-4	-6	0	0	2	4	6	10	14	X	18	X	20	X	26	32	40	60
>3 ≤6	-2	-4	X	1	0	4	8	12	15	19	X	23	X	28	X	35	42	50	80
>6 ≤10	-2	-5	X	1	0	6	10	15	19	23	X	28	X	34	X	42	52	67	97
>10 ≤14	-3	-5	X	1	0	7	12	18	23	28	X	33	X	40	X	50	64	90	130
>14 ≤18	-3	-6	X	1	0	7	12	18	23	28	X	33	39	45	X	60	77	108	150
>18 ≤24	-4	-8	X	2	0	8	15	22	28	35	X	41	47	54	63	73	98	136	188
>24 ≤30	-4	-8	X	2	0	8	15	22	28	35	41	48	55	64	75	88	118	160	218
>30 ≤40	-5	-10	X	2	0	9	17	26	34	43	48	60	68	80	94	112	148	200	274
>40 ≤50	-5	-10	X	2	0	9	17	26	34	43	54	70	81	97	114	136	180	242	325
>50 ≤65	-7	-12	X	2	0	11	20	32	41	53	66	87	102	122	144	172	226	300	405
>65 ≤80	-7	-12	X	2	0	11	20	32	43	59	75	102	120	146	174	210	274	360	480
>80 ≤100	-9	-15	X	3	0	13	23	37	51	71	91	124	146	178	214	258	335	445	585
>100 ≤120	-9	-15	X	3	0	13	23	37	54	79	104	144	172	210	254	310	400	525	690
>120 ≤140	-11	-18	X	3	0	15	27	43	63	92	122	170	202	248	300	365	470	620	800
>140 ≤160	-11	-18	X	3	0	15	27	43	65	100	134	190	228	280	340	415	535	700	900
>160 ≤180	-11	-18	X	3	0	15	27	43	68	108	146	210	252	310	380	465	600	780	1000
>180 ≤200	-13	-21	X	4	0	17	31	50	77	122	166	236	284	350	425	520	670	880	1150
>200 ≤225	-13	-21	X	4	0	17	31	50	80	130	180	258	310	385	470	575	740	960	1250
>225 ≤250	-13	-21	X	4	0	17	31	50	84	140	196	284	340	425	520	640	820	1050	1350
>250 ≤280	-16	-26	X	4	0	20	34	56	94	158	218	315	385	475	580	710	920	1200	1550
>280 ≤315	-16	-26	X	4	0	20	34	56	98	170	240	350	423	525	650	790	1000	1300	1700
>315 ≤355	-18	-28	X	4	0	21	37	62	108	190	268	390	475	590	730	900	1150	1500	1900
>355 ≤400	-18	-28	X	4	0	21	37	62	114	208	294	435	530	660	820	1000	1300	1650	2100
>400 ≤450	-20	-32	X	5	0	23	40	68	126	232	330	490	595	740	920	1100	1450	1850	2400
>450 ≤500	-20	-32	X	5	9	23	40	68	132	252	360	530	660	820	1000	1250	1600	2100	2800

Figura 3.20 - Folha de cálculo “Desvios fundamentais para veios” (posições j5 j6 a zc).

- Folha de cálculo “Desvios fundamentais para furos”:

O mesmo se aplica para as figuras representadas de seguida (figura 3.21 e 3.22) sendo, neste caso, referente a furos.

Desvios fundamentais para cubos de roda - Desvios inferiores (µm)											
	A	B	C	Cd	D	E	EF	F	FG	G	H
Até 1	X	X	60	34	20	14	10	6	-4	2	0
>1 ≤3	270	140	60	34	20	14	10	6	-4	2	0
>3 ≤6	270	140	70	46	30	20	14	10	-6	4	0
>6 ≤10	280	150	80	56	40	25	18	13	-8	5	0
>10 ≤14	290	150	95	X	50	32	X	16	X	6	0
>14 ≤18	290	150	95	X	60	32	X	16	X	6	0
>18 ≤24	300	160	110	X	65	40	X	20	X	7	0
>24 ≤30	300	160	110	X	65	40	X	20	X	7	0
>30 ≤40	310	170	120	X	80	50	X	25	X	9	0
>40 ≤50	320	180	130	X	80	50	X	25	X	9	0
>50 ≤65	340	180	140	X	100	60	X	30	X	10	0
>65 ≤80	360	200	150	X	100	60	X	30	X	10	0
>80 ≤100	380	220	170	X	120	72	X	36	X	12	0
>100 ≤120	410	240	180	X	120	72	X	36	X	12	0
>120 ≤140	460	260	200	X	145	85	X	43	X	14	0
>140 ≤160	520	280	210	X	145	85	X	43	X	14	0
>160 ≤180	580	310	230	X	145	85	X	43	X	14	0
>180 ≤200	660	340	240	X	170	100	X	50	X	15	0
>200 ≤225	740	380	260	X	170	100	X	50	X	15	0
>225 ≤250	820	420	280	X	170	100	X	50	X	15	0
>250 ≤280	920	480	300	X	190	110	X	56	X	17	0
>280 ≤315	1050	540	330	X	190	110	X	56	X	17	0
>315 ≤355	1200	600	360	X	210	125	X	62	X	18	0
>355 ≤400	1350	680	400	X	210	125	X	62	X	18	0
>400 ≤450	1500	760	440	X	230	135	X	68	X	20	0
>450 ≤500	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figura 3.21 - Folha de cálculo “Desvios fundamentais para furos” (posições A a H).

Desvios fundamentais para cubos de roda - Desvios superiores (µm)																			
	J5 J6	J7	J8	K4 a K7	K≤3 K>7	M	N	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC
Até 1	2	4	6	0	0	-2	-4	-6	-10	-14	X	-18	X	-20	X	-26	-32	-40	-60
>1 ≤3	2	4	6	0	0	-2	-4	-6	-10	-14	X	-18	X	-20	X	-26	-32	-40	-60
>3 ≤6	2	4	X	-1	0	-4	-8	-12	-15	-19	X	-23	X	-28	X	-35	-42	-50	-80
>6 ≤10	2	5	X	-1	0	-6	-10	-15	-19	-23	X	-28	X	-34	X	-42	-52	-67	-97
>10 ≤14	3	5	X	-1	0	-7	-12	-18	-23	-28	X	-33	X	-40	X	-50	-64	-90	-130
>14 ≤18	3	6	X	-1	0	-7	-12	-18	-23	-28	X	-33	39	-45	X	-60	-77	-108	-150
>18 ≤24	4	8	X	-2	0	-8	-15	-22	-28	-35	X	-41	-47	-54	-63	-73	-98	-136	-188
>24 ≤30	4	8	X	-2	0	-8	-15	-22	-28	-35	-41	-48	-55	-64	-75	-88	-118	-160	-218
>30 ≤40	5	10	X	-2	0	-9	-17	-26	-34	-43	-48	-60	-68	-80	-94	-112	-148	-200	-274
>40 ≤50	5	10	X	-2	0	-9	-17	-26	-34	-43	-54	-70	-81	-97	-114	-136	-180	-242	-325
>50 ≤65	7	12	X	-2	0	-11	-20	-32	-41	-53	-66	-87	-102	-122	-144	-172	-226	-300	-405
>65 ≤80	7	12	X	-2	0	-11	-20	-32	-43	-59	-75	-102	-120	-146	-174	-210	-274	-360	-480
>80 ≤100	9	15	X	-3	0	-13	-23	-37	-51	-71	-91	-124	-146	-178	-214	-258	-335	-445	-585
>100 ≤120	9	15	X	-3	0	-13	-23	-37	-54	-79	-104	-144	-172	-210	-254	-310	-400	-525	-690
>120 ≤140	11	18	X	-3	0	-15	-27	-43	-63	-92	-122	-170	-202	-248	-300	-365	-470	-620	-800
>140 ≤160	11	18	X	-3	0	-15	-27	-43	-65	-100	-134	-190	-228	-280	-340	-415	-535	-700	-900
>160 ≤180	11	18	X	-3	0	-15	-27	-43	-68	-108	-146	-210	-252	-310	-380	-465	-600	-780	-1000
>180 ≤200	13	21	X	-4	0	-17	-31	-50	-77	-122	-166	-236	-284	-350	-425	-520	-670	-880	-1150
>200 ≤225	13	21	X	-4	0	-17	-31	-50	-80	-130	-180	-258	-310	-385	-470	-575	-740	-960	-1250
>225 ≤250	13	21	X	-4	0	-17	-31	-50	-84	-140	-196	-284	-340	-425	-520	-640	-820	-1050	-1350
>250 ≤280	16	26	X	-4	0	-20	-34	-56	-94	-158	-218	-315	-385	-475	-580	-710	-920	-1200	-1550
>280 ≤315	16	26	X	-4	0	-20	-34	-56	-98	-170	-240	-350	-423	-525	-650	-790	-1000	-1300	-1700
>315 ≤355	18	28	X	-4	0	-21	-37	-62	-108	-190	-268	-390	-475	-590	-730	-900	-1150	-1500	-1900
>355 ≤400	18	28	X	-4	0	-21	-37	-62	-114	-208	-294	-435	-530	-660	-820	-1000	-1300	-1650	-2100
>400 ≤450	20	32	X	-5	0	-23	-40	-68	-126	-232	-330	-490	-595	-740	-920	-1100	-1450	-1850	-2400
>450 ≤500	20	32	X	-5	9	-23	-40	-68	-132	-252	-360	-530	-660	-820	-1000	-1250	-1600	-2100	-2800

Figura 3.22 - Folha de cálculo “Desvios fundamentais para furos” (posições J5 J6 a ZC).

As três folhas de cálculo descritas foram elaboradas tendo por base as tabelas fornecidas pela norma de toleranciamento ISO [26] e [27].

- Folha de cálculo “*Propriedades dos materiais*”:

Para se poder avaliar se uma dada montagem irá suportar as tensões envolvidas sem ultrapassar as tensões admissíveis, é necessário conhecer detalhadamente os materiais que irão ser utilizados. A lista de materiais apresentada (figura 3.23) serve de “base” a todos os cálculos apresentados nesta aplicação informática. Na folha “*Entrada de dados*”, ao se proceder à escolha de um material, o programa vai compilar e utilizar todos os dados referentes a esse material. No caso do material a utilizar não estar contido na lista já existente, deve-se acrescentar esse mesmo material a esta lista. Este passo é feito de forma muito simples, devendo possuir a informação relativa aos seguintes parâmetros:

- Tensão de cedência;
- Coeficiente de Poisson;
- Módulo de elasticidade;
- Coeficiente de dilatação linear térmica;
- Densidade do material;

A folha de Excel criada está preparada para a adição de mais de 500 materiais caso seja necessário.

Material	Norma	W.Nr	Tipo de tratamento	Massa volúmica (g/cm ³)	Dureza (HB Brinell)	Coeficiente de poisson	Coeficiente de dilatação linear térmica (E-06/°C)	Calor específico (J/g.°C)	Condutividade térmica (W/m.K)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
34CrNiMo6 +QT	AISI 4340	1.6582	Temperado e revenido	7.85	263	0.29	11.1	0.46	38	210	700	1000
42CrMo4 +QT	ASTM 4140	1.7225	Temperado e revenido	7.85	245	0.29	11.1	0.473	42.6	210	685	883
42CrMo4 +HT	ASTM 4140	1.7225	Endurecido e revenido	7.85	220	0.29	11.1	0.473	42.6	210	550	875
42CrMo5-04 +N	ASTM 4140	1.7225	Normalizado	7.85	241	0.29	11.1	0.473	42.6	210	485	814
20MnV6 +Q	ASTM A 381	1.5217	Laminado a quente	7.817	225	0.29	11.09	0.473	44.08	205	650	750
17CrNiMo6 +A	AISI 4317/4820	1.6587	Recozido	7.87	200	0.29	11.2	0.46	38	210	815	1010
42CrNiMo6 +Q	AISI 4340	1.6565	Temperado	7.85	255	0.29	12.3	0.475	44.5	205	731	855

Figura 3.23 - Folha de cálculo “*Propriedades dos materiais*”.

3.3.2.2 Folhas de cálculo interactivas

As folhas de cálculo interactivas referem-se às folhas nas quais é possível introduzir ou retirar dados ou mesmo ambos. Estas folhas foram elaboradas de forma a serem de fácil utilização e compreensão por parte de quem as utiliza. Podem ser divididas em 3 tipos de folhas como já foi referido anteriormente:

- De introdução de dados;
- De visualização de dados;
- De visualização/introdução de dados.

• De introdução de dados

- Folha de cálculo “*Entrada de dados*”:

Na folha de cálculo apresentada (figura 3.24) irão ser introduzidos todos os dados relativos à montagem. Estes dados serão posteriormente usados, para o cálculo dos diversos parâmetros da montagem, como por exemplo, tensões máximas, pressão de aperto ou mesmo as temperaturas de arrefecimento/aquecimento. Na folha de cálculo apresentada também se poderá visualizar o tipo de ajustamento presente (ajustamento incerto, com folga ou por interferência), bem como obter a informação quanto à viabilidade da montagem, nomeadamente, se para os dados inseridos, o material suportará as tensões envolvidas.

A	B	C	D	E	F
Diâmetro do ajustamento (mm)	Qualidade IT cubo da roda	Posição de campo do furo	Material da roda	Comprimento da montagem (mm)	Diâmetro exterior da roda (mm)
142	IT 9	H	20MnV6 +Q	40	400
Qualidade IT veio	Posição de campo do veio		Tipo de veio	Diâmetro interior do veio (mm) (se oco)	Rugosidade do veio (µm)
IT 6	u	17CrNiMo6 +A	Maciço	80	0
Tipo de Montagem					

Figura 3.25 - Escolha do ajuste e tolerância.

Cenário 2- Ajustamentos e tolerâncias desconhecidas:

No caso de o utilizador não possuir a informação relativa ao ajustamento irá introduzir o diâmetro do veio (diâmetro exterior) e o diâmetro do cubo da roda (diâmetro interior da roda dentada) retirados das suas medições aos mesmos. Estes valores irão ser introduzidos nas células adjacentes à célula “desconhecimento de ajustamentos” (figura 3.26). Dado que os ajustamentos e as tolerâncias são desconhecidas, apenas irá existir uma interferência (ao contrário do cenário 1 em que irá existir uma interferência máxima e mínima). Esta interferência será denominada (para efeitos de cálculo), interferência média do ajuste. Esta informação é de extrema importância porque, na presença do cenário 2, apenas se deve considerar os parâmetros relativos à interferência média.

Desconhecimento do ajustamento
Diâmetro do cubo da roda exacto (mm)
200.2
Diâmetro do veio exacto (mm)
200.3

Figura 3.26 – Introdução de dados em caso de desconhecimento do ajustamento.

Para ambos os casos (conhecimento e desconhecimento dos ajustamentos e tolerâncias) o utilizador terá que introduzir na célula “Diâmetro de ajustamento”, o diâmetro nominal do ajustamento.

Consoante o tipo de ajuste presente (após a introdução dos dados) a folha de cálculo irá indicar que tipo de montagem será (figura 3.27), mostrando um de três resultados possíveis:

- “Montagem por interferência”, com preenchimento a verde-claro, no caso de se tratar de um ajustamento por interferência;
- “Montagem com folga”, com preenchimento a vermelho-claro, no caso de se tratar de um ajustamento com folga;
- “Ajustamento incerto”, com preenchimento a amarelo-torrado, no caso de se tratar de uma montagem com folga e com aperto.

Tipo de Montagem	
	Montagem por interferência

Figura 3.27 - Tipo de montagem.

De seguida deverá escolher, de uma lista pré-definida de materiais (figura 3.28), o material constituinte do veio e do cubo da roda. Para isso, irá recorrer a uma tabela que aparecerá quando clicando na célula adjacente a “Material da roda/veio”.

Posição de campo do furo	Material da roda	Comprimento da montagem (mm)	Diâmetro exterior da roda (mm)	Rugosidade do cubo da roda (µm)	Coefficiente de atrito na zona de contacto
H	20MnV6 +Q	40	400	0	0.15
Material do	34CrNiMo6 +QT	Diâmetro interior do veio (mm) (se oco)	Rugosidade do veio (µm)	Pressão interna do veio (Mpa) (se existir)	Temperatura ambiente (°C)
	42CrMo4 +QT				
	42CrMo4 +HT				
	42CrMo5-04 +N				
	20MnV6 +Q				
17CrNiMo6 +A					
42CrNiMo6 +Q					
17CrNiMo6 +A	Maciço	80	0	0	22

Figura 3.28 - Escolha do material da roda/veio.

A lista apresentada na célula “Material do veio/roda” é proveniente da lista apresentada na figura 3.23 podendo, caso seja necessário (no caso de um material que não conste na lista pré-definida), acrescentar outros materiais e propriedades respectivas.

Após a definição dos parâmetros anteriores, deve-se proceder à introdução dos dados restantes, como por exemplo, o comprimento da montagem, diâmetros exterior e interior da roda dentada e do veio (maciço ou oco), temperatura ambiente, entre outros (figura 3.29). As rugosidades médias do veio e do cubo da roda na zona de contacto, também podem ser introduzidas nas respectivas células, sendo que, no caso de desconhecimento dos mesmos dever-se-á assumir o valor zero. O coeficiente de atrito na zona de contacto encontra-se pré-definido (0,15) podendo ser alterado se necessário.

Material da roda	Comprimento da montagem (mm)	Diâmetro exterior da roda (mm)	Rugosidade do cubo da roda (μm)	Coeficiente de atrito na zona de contacto
20MnV6 +Q	40	400	0	0.15
Tipo de veio	Diâmetro interior do veio (mm) (se oco)	Rugosidade do veio (μm)	Pressão interna do veio (Mpa) (se existir)	Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
Maciço	80	0	0	22

Figura 3.29 - Dimensões restantes a introduzir referentes à montagem.

De forma a se prever as tensões a que estará sujeita uma dada secção da montagem, poder-se-á introduzir o valor do raio da secção, nas células adjacentes às células “Tensões numa dada secção do veio/roda dentada” (figura 3.30). Para facilitar a introdução destes valores, a folha de cálculo devolverá “válido” (com preenchimento a verde-claro) se o raio introduzido for válido e “não válido” (com preenchimento a vermelho-claro) caso contrário. As tensões calculadas podem ser visualizadas na folha de cálculo “Tensões na montagem” representada futuramente na figura 3.36.

Tensões numa dada secção roda dentada raio (mm)	Tensões numa dada secção do veio raio (mm)
71	51
Válido	Válido

Figura 3.30 - Tensões numa dada secção do raio/roda dentada.

Após a introdução de todos os dados referidos anteriormente, o programa devolverá, tanto para o veio como para a roda dentada, a informação se os materiais escolhidos suportam (“Material suporta as tensões envolvidas”, com preenchimento verde-claro) ou não (“Material não suporta as tensões envolvidas”, com preenchimento vermelho-claro) as tensões envolvidas (figura 3.31). A informação dada,

é calculada tendo por base as pressões de aperto máximas e as tensões máximas da montagem quando comparadas com as tensões admissíveis dos materiais escolhidos.

Comprimento da montagem (mm)	Diâmetro exterior da roda (mm)	Rugosidade do cubo da roda (µm)	Coefficiente de atrito na zona de contacto	Material suporta as tensões envolvidas
120	475	1.6	0.15	
Diâmetro interior do veio (mm) (se oco)	Rugosidade do veio (µm)	Pressão interna do veio (Mpa) (se existir)	Temperatura ambiente (°C)	Material suporta as tensões envolvidas
0	1.6	0	22	

Figura 3.31 - Informação relativa à viabilidade da montagem.

• De visualização de dados

- Folha de cálculo “*Características da montagem*”:

Na folha de cálculo apresentada (figura 3.32) pode ser visualizada toda a informação relativa aos materiais escolhidos bem como alguns dados relativos à montagem.

Cubo da Roda		Veio		Propriedades comuns			
Material	17CrNiMo6 +A	Material	42CrNiMo6 +Q	Temperatura ambiente (°C)	22	Coeficiente de atrito na zona de contacto	0.15
Norma	AI SI 4317/4820	Norma	AI SI 4340				
W.Nr	1.6587	W.Nr	1.6565				
Tipo de tratamento	Recozido	Tipo de tratamento	Temperado	Dados montagem			
Massa volúmica (g/cm3)	7.87	Massa volúmica (g/cm3)	7.85				
Dureza (HB Brinell)	200	Dureza (HB Brinell)	255				
Gama de diâmetros (mm)	0	Gama de diâmetros (mm)	0				
Gama de espessuras (mm)	0	Gama de espessuras (mm)	0	Pressão de aperto (MPa)		127.8093341	
Coeficiente de Poisson	0.29	Coeficiente de Poisson	0.29				
Coeficiente de expansão linear térmica (E-06/ .°C) (aquecimento)	11.2	Coeficiente de expansão linear térmica (E-06/ .°C) (aquecimento)	12.3	Pressão de aperto máxima (MPa) para δmáx		149.8922865	
				Pressão de aperto mínima (MPa) para δmin		105.7263816	
Calor específico (J/g.°C)	0.46	Calor específico (J/g.°C)	0.475	Interferência máxima (µm)		Interferência mínima (µm)	
Condutividade térmica (W/m.K)	38	Condutividade térmica (W/m.K)	44.5	227		162	
Módulo de elasticidade (GPa)	210	Módulo de elasticidade (GPa)	205	Maior Interferência		Menor Interferência	
Tensão de cedência (MPa)	815	Tensão de cedência (MPa)	731	Pressão de aperto com binário transmissível e força axial (Mpa)		180.7496936	
Tensão de ruptura (MPa)	1010	Tensão de ruptura (MPa)	855				
Rugosidade do cubo da roda (µm)	1.6	Rugosidade do veio (µm)	1.6	Binário de aperto (KN.m)		70.82898618	
Diâmetro exterior da roda (mm)	475	Pressão interna (se existir) (MPa)	0				
Comprimento da montagem (mm)	120	Diâmetro interior do veio (mm)	0				
				Força axial (KN)		1011.84266	

Figura 3.32 - Folha de cálculo “*Características da montagem*”.

O valor da interferência ou folga pode ser visualizado nas células adjacentes a “Dados Montagem”. No caso de se tratar de uma montagem por interferência, a folha de cálculo irá devolver os valores máximos e mínimos do ajustamento, acompanhado pela mensagem “maior/menor interferência” (com preenchimento verde-claro) nas células adjacentes (figura 3.33). No caso de se tratar de uma montagem com folga, o raciocínio é análogo mas acompanhado da mensagem “maior/menor folga” (com preenchimento vermelho-claro).

Interferência máxima (μm)	Interferência mínima (μm)
215	90
Maior Interferência	Menor Interferência

Figura 3.33 – Valores da interferência/folga máxima e mínima.

As pressões de aperto máximas e mínimas (para interferência máxima e mínima respectivamente) também podem ser visualizadas na mesma folha de cálculo. A célula representada a vermelho na figura abaixo (figura 3.34), irá corresponder à pressão de aperto para a interferência média. Todas estas pressões são calculadas tendo por base, a equação dada anteriormente, equação 3.41.

Dados montagem	
Pressão de aperto (MPa)	119.7121847
Pressão de aperto máxima (MPa) para $\delta_{\text{máx}}$	141.8055749
Pressão de aperto mínima (MPa) para $\delta_{\text{mín}}$	97.61879459
Interferência máxima (μm)	Interferência mínima (μm)
215	150
Maior Interferência	Menor Interferência
Pressão de aperto com binário transmissível e força axial (Mpa)	169.2985952
Binário de aperto (KN.m)	79.6258749
Força axial (KN)	1121.491196

Figura 3.34 – Dados da montagem.

A aplicação de um binário e de uma força axial à montagem, vai resultar numa pressão de aperto na zona de contacto entre os dois componentes, podendo o seu valor ser visualizado na figura 3.34 (com contorno a azul). Esta pressão de aperto, é calculada com base na equação 3.21.

- Folha de cálculo “*Percentagens de contracção e expansão/Velocidade crítica*”:

As percentagens de contracção/expansão resultantes da interferência definida e a velocidade crítica, podem ser visualizadas na folha de cálculo representada na figura 3.35. A velocidade crítica está definida para três valores típicos de interferência: média, máxima e mínima. Os três valores são calculados através da equação 3.69 referida anteriormente.

Contracção/Expansão devido a pressão de aperto	(μm)	% Contracção/expansão em relação ao raio de aperto		
Contracção radial veio para $\delta_{\text{médio}}$	-23.26600905	0.032769027		
Contracção radial veio para $\delta_{\text{máximo}}$	-32.80125866	0.046198956		
Contracção radial veio para $\delta_{\text{mínimo}}$	-13.73075944	0.019339098		
Expansão radial do cubo da roda para $\delta_{\text{médio}}$	52.98399095	0.074625339		
Expansão radial do cubo da roda para $\delta_{\text{máximo}}$	74.69874134	0.105209495		
Expansão radial do cubo da roda para $\delta_{\text{mínimo}}$	31.26924056	0.044041184		
Velocidade Crítica para:	$\delta_{\text{máximo}}$	$\delta_{\text{mínimo}}$	$\delta_{\text{médio}}$	
ω (rad/s)	1098.32908	710.6152237	925.0137201	
ω (rpm)	10488.27014	6785.87553	8833.230359	

Figura 3.35 - Folha de cálculo “*Percentagens de contracção e expansão/Velocidade crítica*”.

- Folha de cálculo “*Tensões na montagem*”:

De modo a se poder proceder a uma correcta montagem é necessário calcular todas as tensões inerentes à montagem comparando-as com as tensões admissíveis dos materiais em questão. Os valores das tensões tangenciais, radiais e equivalentes são apresentados na folha de cálculo representada na figura 3.36. Também os valores das tensões a que uma dada secção está sujeita (referido na explicação da folha de cálculo “*Entrada de dados*”) podem ser calculados e visualizados nas células adjacentes à célula “Tensões radiais e tangenciais num dado raio da montagem”. Para o cálculo das tensões apresentadas na figura 3.36, foram aplicadas as equações 3.42 a 3.62, utilizando o valor da pressão de aperto média (para interferência média).

RODA DENTADA		VEIO OCO			VEIO MACIÇO	
Tensão mínima radial Roda $r=r_{ext}$ (MPa)	0	Tensão mínima radial veio $r=r_{int}$ (MPa)	0		Tensão radial veio (MPa)	-127.8093341
Tensão máxima radial Roda $r=r_{apert}$ (MPa)	-127.80933	Tensão máxima radial veio $r=r_{apert}$ (MPa)	0		Tensão tangencial veio (MPa)	-127.8093341
Tensão equivalente Roda $r=r_{apert}$ (MPa)	279.93672	Tensão tangencial mínima veio $r=r_{apert}$ (MPa)	0	$>p_{aperto}$	Tensão equivalente veio (MPa)	127.8093341
Tensão tangencial mínima Roda $r=r_{ext}$ (MPa)	24.318048	Tensão tangencial máxima veio $r=r_{int}$ (MPa)	0	$>p_{aperto}$	Tensão máxima no cubo da roda (MPa)	279.9367164
Tensão tangencial máxima Roda $r=r_{apert}$ (MPa)	152.12738	Tensão equivalente veio $r=r_{apert}$ (MPa)	0	$p_{int}<p_{aperto}$	Tensão máxima no veio (MPa)	127.8093341
Tensões radiais e tangenciais num dado raio da montagem						
Parâmetros	Roda dentada	Veio maciço		Veio oco		
Tensão radial (MPa)	-95.00425011	-127.8093341		0		
Tensão tangencial (MPa)	119.3222984	-127.8093341		0		
raio considerado (mm)	80	51		51		

Figura 3.36 - Folha de cálculo “*Tensões na montagem*”.

• De visualização/introdução de dados

- Folha de cálculo “*Temperaturas de arrefecimento e aquecimento*”:

A folha de cálculo apresentada na figura 3.37 será a folha de apoio fornecida ao operário, na medida em que lhe dará as temperaturas às quais se terá de arrefecer o veio ou mesmo de aquecer também o cubo da roda (no caso do arrefecimento do veio não ser suficiente). A folha de cálculo foi programada para se proceder sempre ao arrefecimento do veio e só em caso de necessidade (se a contracção do veio não for suficiente para garantir a montagem) se proceder também ao aquecimento do cubo da roda. A preferência pelo arrefecimento em detrimento do aquecimento deve-se essencialmente ao facto das propriedades mecânicas do material melhorarem após um arrefecimento [9].

Dados para Aquecimento / Arrefecimento para:	Interferência média	Interferência máxima	Interferência mínima
Interferência pretendida (m)	0.00019450	0.00022700	0.00016200
Coefficiente de dilatação térmica do cubo da roda (por °C)	1.12E-05	1.12E-05	1.12E-05
Coefficiente de dilatação térmica veio (por °C)	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05
Temperatura ambiente (°C)	22	22	22
Só arrefecimento (°C)	-90.95005807	-109.8234611	-72.07665505
Só aquecimento (°C)	146.0433673	166.7704082	125.3163265
Temperatura possível de atingir para arrefecimento veio (°C)	-79	-79	-79
Raio de aperto (m)	0.07	0.07	0.07
Arrefecimento e Aquecimento			
Temperatura de arrefecimento do veio (°C)	-79	-79	-72.07665505
Contracção veio devido ao arrefecimento (m) (diametral)	-0.000173922	-0.000173922	-0.000162
Diferença restante (m) (diametral)	0.00002058	0.00005308	0.00000000
Temperatura de aquecimento restante do cubo da roda (°C)	35.12372449	55.85076531	0
% Contracção veio devido ao arrefecimento (m) (diametral)	-0.12423	-0.12423	-0.115714286
% Expansão cubo da roda devido ao arrefecimento (m) (diametral)	0.014698571	0.037912857	0
Procedimento			
Aquecer cubo da roda também		Aquecer cubo da roda também	Arrefecer veio apenas

Figura 3.37 - Folha de cálculo “Temperaturas de arrefecimento e aquecimento”.

Assim, da folha de cálculo podem ser retiradas as temperaturas de arrefecimento para diferentes ajustes de interferência (interferência média, máxima e mínima) bem como as temperaturas de aquecimento caso seja necessário. Também se pode visualizar as percentagens de contracção e expansão do veio e cubo da roda, respectivamente.

No caso de ser possível atingir uma determinada temperatura de arrefecimento diferente da pré-definida (-79°C para gelo seco), pode-se introduzir essa mesma temperatura na célula adjacente a “Temperatura possível de atingir para arrefecimento veio” (observar figura 3.38, com contorno a vermelho). O programa irá assumir essa temperatura como limite de arrefecimento e só quando for atingida é que se procederá ao aquecimento (caso necessário).

Dados para Aquecimento / Arrefecimento para:	Interferência média
Interferência pretendida (m)	0.00019450
Coefficiente de dilatação térmica do cubo da roda (por °C)	1.12E-05
Coefficiente de dilatação térmica veio (por °C)	1.23E-05
Temperatura ambiente (°C)	22
Só arrefecimento (°C)	-90.95005807
Só aquecimento (°C)	146.0433673
Temperatura possível de atingir para arrefecimento veio (°C)	-79
Raio de aperto (m)	0.07
Arrefecimento e Aquecimento	
Temperatura de arrefecimento do veio (°C)	-79

Figura 3.38 – Temperatura possível de atingir para arrefecimento do veio.

Se o arrefecimento do veio for suficiente para garantir a montagem, irá aparecer nas caixas de instrução “Arrefecer veio apenas” com preenchimento azul-escuro. Caso não seja suficiente, irá aparecer, “Aquecer cubo da roda também” com preenchimento a vermelho-claro. A temperatura a que se terá de aquecer o cubo da roda (no caso de ser necessário um aquecimento) para uma situação de interferência média, encontra-se especificada na figura 3.39, contornada a vermelho.

Arrefecimento e Aquecimento			
Temperatura de arrefecimento do veio (°C)	-79	-79	-72.07665505
Contracção veio devido ao arrefecimento (m) (diametral)	-0.000173922	-0.000173922	-0.000162
Diferença restante (m) (diametral)	0.00002058	0.00005308	0.00000000
Temperatura de aquecimento restante do cubo da roda (°C)	35.12372449	55.85076531	0
% Contracção veio devido ao arrefecimento (m) (diametral)	-0.12423	-0.12423	-0.115714286
% Expansão cubo da roda devido ao arrefecimento (m) (diametral)	0.014698571	0.037912857	0
Procedimento			
Aquecer cubo da roda também		Aquecer cubo da roda também	Arrefecer veio apenas

Figura 3.39 – Procedimento e temperatura de aquecimento do cubo da roda.

4 Parte experimental

4.1 Montagens experimentais realizadas

Foram realizadas 2 montagens experimentais na unidade fabril da SEW-Eurodrive na Mealhada.

Utilizaram-se 2 tipos de termómetros bem como um programa de leitura das imagens termográficas de forma a monitorizar a evolução da temperatura dos componentes durante toda a montagem:

- Câmara de imagens térmicas Fluke Ti20 (figura 4.1a);
- Termómetro de infravermelhos Fluke 65 (figura 4.1b);
- InsideIR.



Figura 4.1 – a) Câmara de imagens térmicas Fluke Ti20 [36]; b) Termómetro de infravermelhos Fluke 65 [37].

A gama de temperaturas bem como a precisão dos termómetros usados, podem ser visualizadas na tabela 4.1 representada de seguida.

Tabela 4.1 – Especificações dos termómetros utilizados [38] [39].

Referência do termómetro	Gama de temperaturas	Precisão
Fluke Ti20	-10°C a 350°C	$T > 0^{\circ}\text{C}: \pm 2^{\circ}\text{C}$; $T < 0^{\circ}\text{C}: \pm 3^{\circ}\text{C}$
Fluke 65	-40°C a 500°C	$T > 0^{\circ}\text{C}: \pm 2^{\circ}\text{C}$; $T < 0^{\circ}\text{C}: \pm 5^{\circ}\text{C}$

• Caso Prático nº1

Descrição da montagem:

Pretende-se montar um cubo de uma roda dentada (composta por um casquilho e uma coroa dentada) num veio maciço. O diâmetro interior de ajuste do cubo da roda (na zona de aperto) é 142H7 e o seu comprimento de montagem é de 140 mm. O diâmetro exterior é 500h11. O material constituinte do cubo da roda é o aço 42CrMo5-04.

Para o veio, o diâmetro exterior (na zona de aperto) é 142u6 e o material constituinte do veio é o aço 34CrNiMo6.

Tanto para o veio como para o cubo da roda, o estado da superfície de contacto de ambas as peças (na zona de aperto) é N7. Dado que não ter sido possível medir o coeficiente de atrito entre materiais na zona de contacto, assumiu-se como sendo 0,15.

A temperatura ambiente medida foi de 22°C.

Arrefeceu-se o veio em gelo seco (numa caixa propositadamente adquirida para o efeito), por um período de 12 horas (figura 4.2). Utilizou-se uma máquina de lavar-peças industrial para aquecer o cubo da roda, fazendo não só o aquecimento do cubo da roda mas também a limpeza de quaisquer impurezas existentes.



Figura 4.2 - Veio em gelo seco.

Transportou-se, com ajuda de uma empilhadora, o cubo da roda para o local da montagem. Mediu-se a temperatura na zona interior da roda (cubo da roda) tendo-se registado 70°C.

De seguida, o veio arrefecido foi retirado da caixa de gelo seco encomendada para o efeito (figura 4.3). O veio foi transportado para o local da montagem com o auxílio de um guindaste, devido às suas dimensões. O transporte de ambos os componentes, foi feito de forma rápida de forma a minimizar as perdas de calor. Utilizando o termómetro de infravermelhos mediu-se a temperatura do veio no local da montagem tendo-se registado -40°C. O valor de temperatura medido não corresponde à temperatura real do veio pois trata-se da temperatura mínima da escala de temperaturas do termómetro (ver especificações na tabela 4.1). Considerando a temperatura do gelo seco (-79°C) e a existência de trocas de calor entre o veio e o meio ambiente durante o transporte do mesmo, pode-se definir a temperatura do veio no momento da montagem como sendo na ordem dos -55°C.



Figura 4.3 - Veio pronto a ser transportado

Agora que ambos os componentes já se encontram no local da montagem, procedeu-se ao acoplamento do veio na roda. A centragem dos componentes e o início do acoplamento foi efectuado com bastante precaução, de modo a não provocar a deformação da zona de contacto entre os componentes (figura 4.4).



Figura 4.4 - Montagem do veio na roda

O veio foi inserido livremente no cubo da roda. O conjunto depois de montado, foi deixado em repouso, permitindo que ambos os componentes atingissem livremente uma temperatura de equilíbrio entre eles (figura 4.5). Assim, a distribuição de tensões ao longo da zona de aperto irá ocorrer naturalmente.



Figura 4.5 - Aspecto final da montagem.

Um resumo de todos os parâmetros de montagem relativos ao caso prático 1, pode ser visualizado na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resumo das características da montagem (caso prático 1).

Modo de arrefecimento	Gelo seco
Duração do arrefecimento	12 horas
Temperatura atingida no aquecimento (aproximada)	70-80°C
Temperatura atingida no arrefecimento (aproximada)	-79°C
Modo de aquecimento	Máquina de lavar-peças
Temperatura do cubo da roda antes da montagem	70°C
Temperatura do veio antes da montagem (assumida)	-55°C
Diâmetro original da roda (na zona de montagem por aperto)	142H7
Diâmetro original do veio (na zona de montagem por aperto)	142u6
Material do veio	34CrNiMo6
Material da roda	42CrMo5-04
Tipo de veio	Maciço
Diâmetro externo do cubo da roda	500h11
Rugosidade da zona de contacto	N7
Comprimento da montagem	140 mm
Temperatura ambiente	22°C
Coeficiente de atrito entre materiais (assumido)	0,15

• Caso prático nº2

Descrição da montagem:

Pretende-se montar uma roda dentada cilíndrica de dentado helicoidal num veio maciço. O diâmetro interior do cubo da roda (na zona de aperto) é 140H7 e o seu comprimento de montagem é de 120 mm. O diâmetro da circunferência de cabeça da roda dentada é 475 mm. O material constituinte da roda dentada é o aço 17CrNiMo6.

Para o veio, o diâmetro exterior (na zona de aperto) é 142v6 e o material constituinte do veio é o aço 42CrNiMo6.

Tanto para o veio como para o cubo da roda, não foi possível ter acesso ao acabamento superficial da superfície de contacto de ambas as peças (na zona de aperto). Para efeitos de cálculos, vai-se assumir o

valor de acabamento médio N7, tanto para o veio como para o cubo da roda. Pela mesma razão, assumiu-se o coeficiente de atrito entre materiais (na zona de contacto) como sendo 0,15.

A temperatura ambiente medida foi de 22°C.

Arrefeceu-se o veio em gelo seco (numa caixa propositadamente adquirida para o efeito), por um período de 5,5 horas (figuras 4.6a e 4.6b).



Figura 4.6 – a) Rótulo da caixa de gelo seco; b) Caixa de arrefecimento do veio.

Utilizou-se uma máquina de lavar-peças industrial para aquecer o cubo da roda, fazendo não só o aquecimento do cubo da roda mas também a limpeza de quaisquer impurezas existentes (figura 4.7).



Figura 4.7 - Roda dentada à saída da máquina de lavar-peças industrial.

Mediu-se a temperatura do cubo da roda (na zona de aperto) à saída da máquina de lavar-peças industrial tendo-se registado 60°C. A imagem termográfica representada na figura 4.8 permite visualizar as temperaturas atingidas em diferentes zonas da roda dentada.

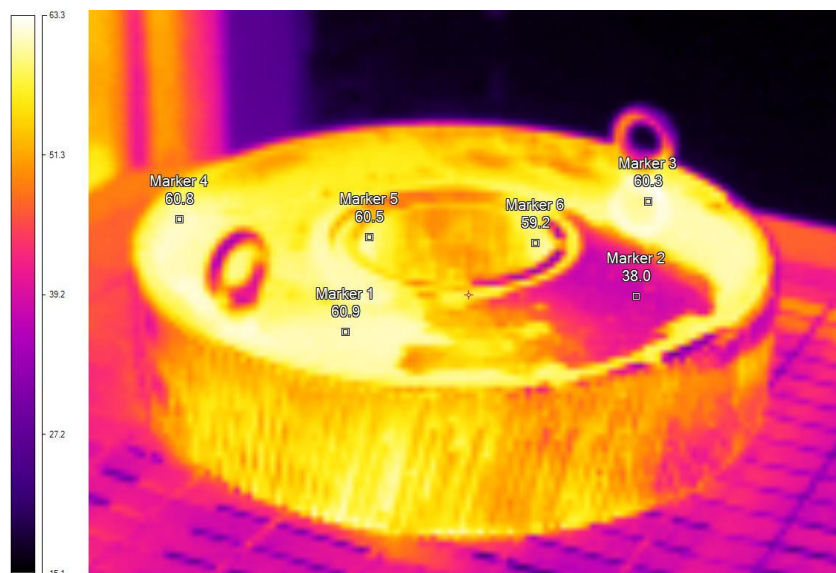


Figura 4.8 - Imagem termográfica (com escala de temperaturas) da roda dentada à saída da máquina de lavar-peças industrial.

Transportou-se, com ajuda de um guindaste, o cubo da roda para o local da montagem. Mediu-se novamente a temperatura na zona interior da roda (cubo da roda) tendo-se registado 56°C (figura 4.9).

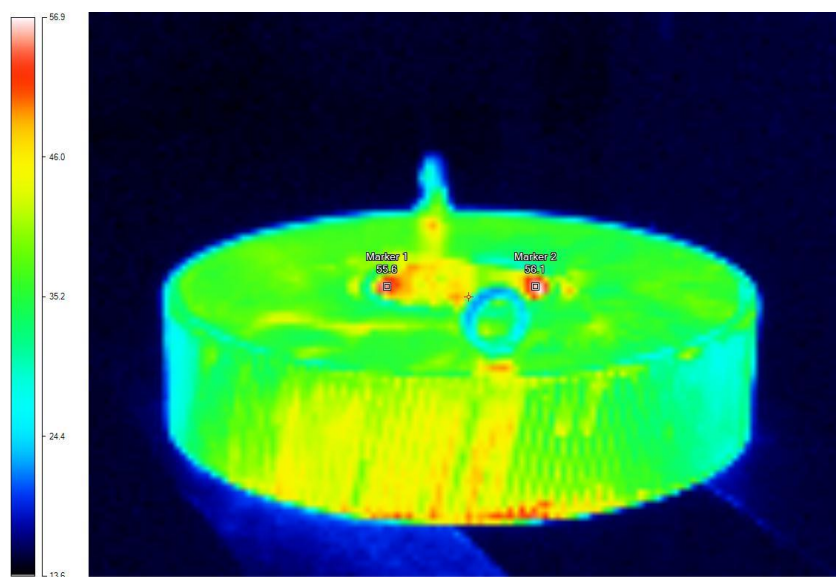


Figura 4.9 - Imagem termográfica (com escala de temperaturas) da roda dentada no local da montagem.

De seguida, retirou-se da caixa de gelo seco o veio arrefecido (figura 4.10a). Mediu-se a temperatura com o auxílio do termómetro de infravermelhos tendo-se registado a temperatura de -40°C (figura 4.10b). Esta temperatura não será a real dado que trata da temperatura limite na escala do

termómetro. Será portanto de admitir que o veio estará a uma temperatura inferior, próxima dos -79°C (temperatura do gelo seco).



Figura 4.10 - a) Limpeza do gelo seco sobre o veio; b) Medição da temperatura do veio com o auxílio de um termómetro de infravermelhos.

O veio foi transportado para o local da montagem com o auxílio de um guindaste, devido às suas elevadas dimensões. O transporte do veio e da roda dentada foi efectuado rapidamente.

Foram medidas novamente as temperaturas de ambos os componentes no local da montagem, tendo-se registado 50°C no caso da roda dentada e -15°C (a partir da imagem termográfica). De referir que no caso do veio, a temperatura apresentada na figura 4.11 não corresponde à realidade dado que se trata da temperatura limite do programa de tratamento de imagens termográficas (InsideIR). Com o auxílio do termómetro de infravermelhos, registou-se novamente -40°C (temperatura mínima da escala do termómetro). A mesma consideração feita (devido às trocas de calor do veio com o meio ambiente) para a montagem experimental 1 pode ser feita para esta montagem: o valor da temperatura do veio no momento imediatamente antes da montagem pode ser considerado -55°C .

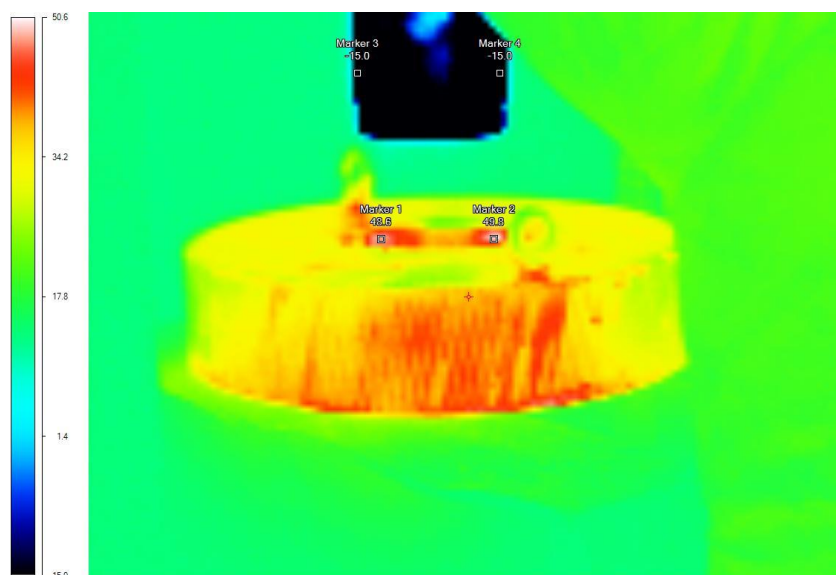


Figura 4.11 - Imagem termográfica (com escala de temperaturas) da roda dentada e do veio instantes antes do acoplamento.

Agora que ambos os componentes já se encontram no local da montagem, procedeu-se ao acoplamento do veio na roda. Após a centragem do veio em relação ao cubo da roda, o veio foi inserido livremente até onde foi possível. A montagem foi efectuada de forma cuidada, de modo a evitar deformações na zona de contacto de ambos os componentes (figuras 4.12a e 4.12b).

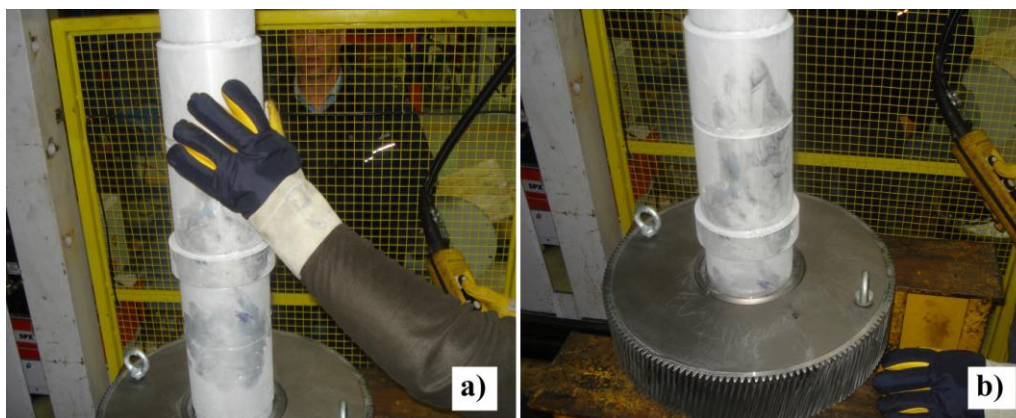


Figura 4.12 - a) Centragem do veio com o cubo da roda; b) Montagem do veio na roda dentada.

A extensão do veio que não foi possível inserir livremente no cubo da roda, foi inserida com o auxílio de uma prensa hidráulica como pode ser visualizado na figura 4.13 apresentada de seguida.



Figura 4.13 – Acoplamento restante com o auxílio de uma prensa.

A sequência de imagens apresentadas de seguida (figura 4.14) diz respeito a perspectivas ampliadas dos momentos decorridos desde a aplicação da força de compressão (por intermédio da prensa) no veio até ao momento em que a montagem é finalizada.

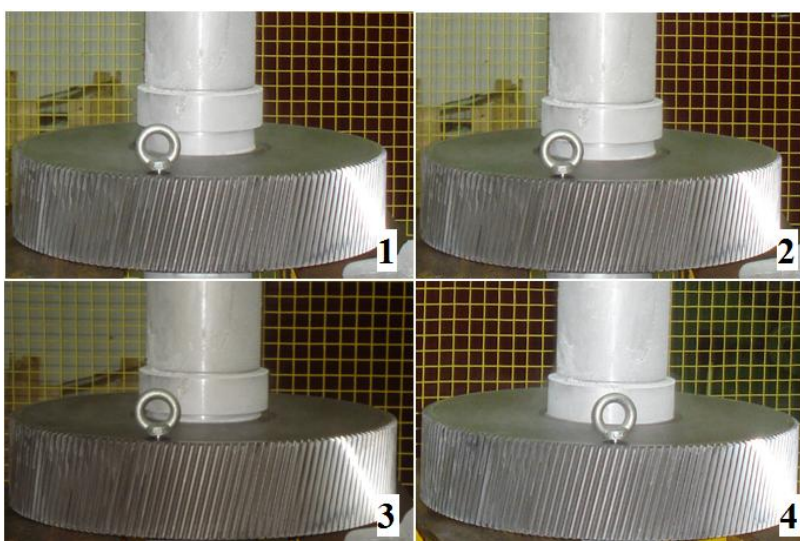


Figura 4.14 - Sequência de imagens de perspectivas ampliadas da montagem

Após a finalização da montagem, o conjunto foi deixado em repouso, para que ambos os componentes atingissem livremente uma temperatura de equilíbrio entre eles (figura 4.15).



Figura 4.15 - Montagem finalizada.

Os diversos parâmetros da montagem podem ser visualizados de uma forma sintetizada na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resumo das características da montagem (caso prático 2).

Modo de arrefecimento	Gelo seco
Duração do arrefecimento	5,5 horas
Temperatura atingida no arrefecimento (aproximada)	-79°C
Temperatura atingida no aquecimento (aproximada)	70-80°C
Modo de aquecimento	Máquina de lavar-peças
Temperatura da roda dentada à saída da máquina lavar-peças	60,5°C
Diâmetro original da roda (na zona de montagem por aperto)	140H7
Diâmetro original do veio (na zona de montagem por aperto)	140v6
Temperatura da roda dentada antes da montagem	50°C
Temperatura do veio antes da montagem (assumida)	-55°C
Material do veio	42CrNiMo6
Material da roda dentada	17CrNiMo6
Tipo de veio	Maciço
Diâmetro da circunferência de cabeça da roda dentada	475 mm
Rugosidade da zona de contacto (assumida)	N7
Comprimento da montagem	120 mm
Temperatura ambiente	22°C
Coeficiente de atrito entre materiais (assumido)	0.15

4.2 Análise das montagens experimentais realizadas

Neste subcapítulo vai-se analisar as duas montagens experimentais realizadas utilizando a aplicação informática desenvolvida.

4.2.1 Análise da montagem experimental 1

- Folha de cálculo “*Entrada de dados*”:

Na folha de cálculo “*Entrada de dados*” representada na figura 4.16 foram inseridos todos os dados referentes à montagem experimental realizada. Pode-se salientar dois aspectos: o tipo de montagem a efectuar será uma montagem por interferência; as tensões envolvidas na montagem não excedem as tensões admissíveis dos materiais utilizados (para o veio e cubo da roda dentada), tornando a montagem viável.

Diâmetro do ajustamento (mm)	Qualidade IT cubo da roda	Posição de campo do furo	Material da roda	Comprimento da montagem (mm)	Diâmetro exterior da roda (mm)	Rugosidade do cubo da roda (μm)	Coefficiente de atrito na zona de contacto	Material suporta as tensões envolvidas	
142	IT 7	H	42CrMo5-04 +N	140	500	1.6	0.15		
Qualidade IT veio	Posição de campo do veio	Material do veio	Tipo de veio	Diâmetro interior do veio (mm) (se oco)	Rugosidade do veio (μm)	Pressão interna do veio (Mpa) (se existir)	Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	Material suporta as tensões envolvidas	
IT 6	u	34CrNiMo6 +QT	Maciço	0	1.6	0	22		
									Desconhecimento do ajustamento
Tipo de Montagem							Tensões numa dada secção roda dentada raio (mm)	Tensões numa dada secção do veio raio (mm)	Diâmetro do cubo da roda exacto (mm)
Montagem por interferência							80	51	0
							Válido	Válido	Diâmetro do veio exacto (mm)
									0

Figura 4.16 - Folha de cálculo “*Entrada de dados*” para a montagem experimental 1.

- Folha de cálculo “*Características da montagem*”:

Na folha de cálculo referente à montagem realizada (figura 4.17) pode-se visualizar as pressões de aperto máximas envolvidas bem como as propriedades dos materiais utilizados.

O binário de aperto indicado, corresponde ao momento de rotação que o conjunto (veio e roda dentada) poderá transmitir sem que ocorra escorregamento dum componente em relação ao outro. A pressão de aperto máxima (crítica), corresponderá à pressão de aperto numa situação de interferência máxima entre componentes. Os dados apresentados fornecem uma informação valiosa no que à capacidade da montagem diz respeito. As interferências máxima e mínima também podem ser visualizadas na mesma folha de cálculo.

Cubo da Roda		Veio		Propriedades comuns			
Material	42CrMo5-04 +N	Material	34CrNiMo6 +QT	Temperatura ambiente (°C)	22	Coeficiente de atrito na zona de contacto	0.15
Norma	ASTM 4140	Norma	AISI 4340				
W.Nr	1.7225	W.Nr	1.6582				
Tipo de tratamento	Normalizado	Tipo de tratamento	Temperado e revenido	Dados montagem			
Massa volúmica (g/cm3)	7.85	Massa volúmica (g/cm3)	7.85				
Dureza (HB Brinell)	241	Dureza (HB Brinell)	263				
Gama de diâmetros (mm)	0	Gama de diâmetros (mm)	0				
Gama de espessuras (mm)	0	Gama de espessuras (mm)	0				
Coeficiente de Poisson	0.29	Coeficiente de Poisson	0.29	Pressão de aperto (MPa)		119.7121847	
Coeficiente de expansão linear térmica (E-06/ .°C) (aquecimento)	11.1	Coeficiente de expansão linear térmica (E-06/ .°C) (aquecimento)	11.1	Pressão de aperto máxima (MPa) para δmáx		141.8055749	
				Pressão de aperto mínima (MPa) para δmín		97.61879459	
Calor específico (J/g.°C)	0.473	Calor específico (J/g.°C)	0.46	Interferência máxima (µm)		Interferência mínima (µm)	
Condutividade térmica (W/m.K)	42.6	Condutividade térmica (W/m.K)	38	215		150	
Módulo de elasticidade (GPa)	210	Módulo de elasticidade (GPa)	210	Maior Interferência		Menor Interferência	
Tensão de cedência (MPa)	485	Tensão de cedência (MPa)	700	Pressão de aperto com binário transmissível e força axial (Mpa)		169.2985952	
Tensão de ruptura (MPa)	814	Tensão de ruptura (MPa)	1000				
Rugosidade do cubo da roda (µm)	1.6	Rugosidade do veio (µm)	1.6	Binário de aperto (KN.m)		79.6258749	
Diâmetro exterior da roda (mm)	500	Pressão interna (se existir) (MPa)	0	Força axial (KN)		1121.491196	
Comprimento da montagem (mm)	140	Diâmetro interior do veio (mm)	0				

Figura 4.17 - Folha de cálculo “*Características da montagem*” para a montagem experimental 1.

- Folha de cálculo “*Tensões na montagem*”:

A folha de cálculo apresentada (figura 4.18), indica as tensões máximas a que o veio e a roda dentada estão sujeitas. Observando estes valores é possível deduzir se a montagem irá suportar as tensões a que estará sujeita. De salientar que a tensão máxima atingida no veio, 119,7 MPa é inferior à tensão admissível do material, 485 MPa. O mesmo sucede para o cubo da roda dentada.

RODA DENTADA		VEIO OCO			VEIO MACIÇO	
Tensão mínima radial Roda $r=r_{ext}$ (Mpa)	0	Tensão mínima radial veio $r=r_{int}$ (MPa)	0		Tensão radial veio (MPa)	-119.7121847
Tensão máxima radial Roda $r=r_{apert}$ (Mpa)	-119.71218	Tensão máxima radial veio $r=r_{apert}$ (Mpa)	0		Tensão tangencial veio (MPa)	-119.7121847
Tensão equivalente Roda $r=r_{apert}$ (MPa)	260.42958	Tensão tangencial mínima veio $r=r_{apert}$ (Mpa)	0	>paperto	Tensão equivalente veio (MPa)	119.7121847
Tensão tangencial mínima Roda $r=r_{ext}$ (MPa)	21.005208	Tensão tangencial máxima veio $r=r_{int}$ (Mpa)	0	>paperto	Tensão máxima no cubo da roda (MPa)	260.4295775
Tensão tangencial máxima Roda $r=r_{apert}$ (MPa)	140.71739	Tensão equivalente veio $r=r_{apert}$ (Mpa)	0	pint<paperto	Tensão máxima no veio (MPa)	119.7121847
Tensões radiais e tangenciais num dado raio da montagem						
Parâmetros	Roda dentada	Veio maciço		Veio oco		
Tensão radial (MPa)	-92.06188819	-119.7121847		0		
Tensão tangencial (MPa)	113.0670962	-119.7121847		0		
raio considerado (mm)	80	51		51		

Figura 4.18 - Folha de cálculo “*Tensões na montagem*” para a montagem experimental 1.

- Folha de cálculo “*Percentagens de contracção e expansão/Velocidade crítica*”:

Na folha de cálculo representada na figura 4.19 pode-se visualizar as percentagens e valores de contracção/expansão. A velocidade máxima de rotação (na presença de interferência máxima entre componentes) que o conjunto (veio e roda dentada) poderá atingir será de 8476 r.p.m. Uma velocidade de rotação superior à indicada poderá originar a soldura da roda dentada no veio, danificando ambos os componentes e incapacitando o funcionamento do redutor.

Contração/Expansão devido a pressão de aperto	(μm)	% Contração/expansão em relação ao raio de aperto	
Contração radial veio para δ médio	-28.73662492	0.04047412	
Contração radial veio para δ máximo	-34.04009062	0.04794379	
Contração radial veio para δ mínimo	-23.43315922	0.03300445	
Expansão radial do cubo da roda para δ médio	59.31337508	0.083539965	
Expansão radial do cubo da roda para δ máximo	70.25990938	0.098957619	
Expansão radial do cubo da roda para δ mínimo	48.36684078	0.068122311	
Velocidade Crítica para:	δ máximo	δ mínimo	δ médio
ω (rad/s)	887.6503216	741.4268583	817.813206
ω (rpm)	8476.436186	7080.104966	7809.540855

Figura 4.19 - Folha de cálculo “Percentagens de contração e expansão/Velocidade crítica” para a montagem experimental 1.

- Folha de cálculo “Temperaturas de arrefecimento e aquecimento”:

A folha de cálculo apresentada na figura 4.20, dá a indicação ao utilizador das temperaturas a atingir (temperatura de arrefecimento do veio e de aquecimento do cubo da roda dentada) para concretizar a montagem. Alterou-se a temperatura possível de atingir num arrefecimento, com contorno a vermelho na figura 4.20, para o valor de -55° . A alteração foi feita tomando em consideração o valor de temperatura do veio assumida (devido às trocas de calor) no momento imediatamente antes de se proceder à montagem. Pode-se visualizar as temperaturas de aquecimento/arrefecimento dos componentes, calculadas para três diferentes situações de ajustamento (interferência máxima, mínima e média) bem como o procedimento a adoptar. Neste caso, para as três situações de interferência definidas, o arrefecimento do veio deve ser complementado por um aquecimento do cubo da roda.

Dados para Aquecimento / Arrefecimento para:	Interferência média	Interferência máxima	Interferência mínima
Interferência pretendida (m)	0.00018250	0.00021500	0.00015000
Coefficiente de dilatação térmica do cubo da roda (por $^{\circ}\text{C}$)	1.11E-05	1.11E-05	1.11E-05
Coefficiente de dilatação térmica veio (por $^{\circ}\text{C}$)	1.11E-05	1.11E-05	1.11E-05
Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	22	22	22
Só arrefecimento ($^{\circ}\text{C}$)	-93.78479888	-114.4040096	-73.16558812
Só aquecimento ($^{\circ}\text{C}$)	137.7847989	158.4040096	117.1655881
Temperatura possível de atingir para arrefecimento veio ($^{\circ}\text{C}$)	-55	-55	-55
Raio de aperto (m)	0.071	0.071	0.071
Arrefecimento e Aquecimento			
Temperatura de arrefecimento do veio ($^{\circ}\text{C}$)	-55	-55	-55
Contração veio devido ao arrefecimento (m) (diametral)	-0.000121367	-0.000121367	-0.000121367
Diferença restante (m) (diametral)	0.00006113	0.00009363	0.00002863
Temperatura de aquecimento restante do cubo da roda ($^{\circ}\text{C}$)	60.78479888	81.40400964	40.16558812
% Contração veio devido ao arrefecimento (m) (diametral)	-0.08547	-0.08547	-0.08547
% Expansão cubo da roda devido ao arrefecimento (m) (diametral)	0.043051127	0.065938451	0.020163803
Procedimento			
Aquecer cubo da roda também		Aquecer cubo da roda também	Aquecer cubo da roda também

Figura 4.20 - Folha de cálculo “Temperaturas de arrefecimento e aquecimento” para a montagem experimental 1.

Analisando a folha de cálculo (figura 4.20) e comparando-a com os dados relativos à montagem pode-se salientar um facto importante:

- O valor da temperatura do cubo da roda registado momentos antes da montagem (70°C) situa-se acima dos valores de temperatura de aquecimento definidas para situações de interferência mínima e média.

Este facto pode indicar, a razão do veio ter sido inserido livremente no cubo da roda. O aquecimento sofrido pelo cubo da roda foi superior ao indicado para uma situação de interferência média, originando, para situações de ajustes compreendidos entre o ajuste mínimo e médio (correspondentes a 97,5% dos casos como já referido anteriormente), uma maior expansão do cubo da roda e por conseguinte o acoplamento completo do veio sem o auxílio de uma prensa.

O que se pretende numa montagem por interferência com arrefecimento/aquecimento dos componentes é exactamente o que sucedeu nesta montagem experimental 1: O veio e o cubo da roda foram acoplados livremente, não ocorrendo deformação do material. No entanto, um aquecimento excessivo do cubo da roda (e consequente aumento do diâmetro) pode provocar o aparecimento de tensões inportáveis ao material, sendo esta situação indesejável.

4.2.2 Análise da montagem experimental 2

- Folha de cálculo “*Entrada de dados*”:

Os dados relativos à montagem experimental 2 foram inseridos na folha de cálculo representada na figura 4.21. Analisando a figura pode-se confirmar que se trata de uma montagem por interferência e demonstrar a viabilidade da montagem (as tensões atingidas são inferiores às admissíveis dos materiais utilizados).

Diâmetro do ajustamento (mm)	Qualidade IT cubo da roda	Posição de campo do furo	Material da roda	Comprimento da montagem (mm)	Diâmetro exterior da roda (mm)	Rugosidade do cubo da roda (µm)	Coefficiente de atrito na zona de contacto	Material suporta as tensões envolvidas	
140	IT 7	H	17CrNiMo6 +A	120	475	1.6	0.15		
Qualidade IT veio	Posição de campo do veio	Material do veio	Tipo de veio	Diâmetro interior do veio (mm) (se oco)	Rugosidade do veio (µm)	Pressão interna do veio (Mpa) (se existir)	Temperatura ambiente (°C)	Material suporta as tensões envolvidas	
IT 6	v	42CrNiMo6 +Q	Maciço	0	1.6	0	22		
									Desconhecimento do ajustamento
			Tipo de Montagem				Tensões numa dada secção roda dentada raio (mm)	Tensões numa dada secção do veio raio (mm)	Diâmetro do cubo da roda exacto (mm)
			Montagem por interferência				80	51	0
									Diâmetro do veio exacto (mm)
							Válido	Válido	0

Figura 4.21 - Folha de cálculo “*Entrada de dados*” para a montagem experimental 2.

- Folha de cálculo “*Características da montagem*”:

Analisando a folha de cálculo representada na figura 4.22 pode-se retirar a pressão de aperto máxima (na situação de interferência máxima) bem como o momento de rotação possível de ser transmitido pelo conjunto, 70,82 KN·m. Os valores da interferência máxima bem como da interferência mínima podem ser também visualizados.

Cubo da Roda		Veio		Propriedades comuns			
Material	17CrNiMo6 +A	Material	42CrNiMo6 +Q	Temperatura ambiente (°C)	22	Coeficiente de atrito na zona de contacto	0.15
Norma	AISI 4317/4820	Norma	AISI 4340				
W.Nr	1.6587	W.Nr	1.6565				
Tipo de tratamento	Recozido	Tipo de tratamento	Temperado	Dados montagem			
Massa volúmica (g/cm3)	7.87	Massa volúmica (g/cm3)	7.85				
Dureza (HB Brinell)	200	Dureza (HB Brinell)	255				
Gama de diâmetros (mm)	0	Gama de diâmetros (mm)	0				
Gama de espessuras (mm)	0	Gama de espessuras (mm)	0				
Coeficiente de Poisson	0.29	Coeficiente de Poisson	0.29	Pressão de aperto (MPa)		127.8093341	
Coeficiente de expansão linear térmica (E-06/ .°C) (aquecimento)	11.2	Coeficiente de expansão linear térmica (E-06/ .°C) (aquecimento)	12.3	Pressão de aperto máxima (MPa) para δmáx		149.8922865	
				Pressão de aperto mínima (MPa) para δmín		105.7263816	
Calor específico (J/g.°C)	0.46	Calor específico (J/g.°C)	0.475	Interferência máxima (µm)		Interferência mínima (µm)	
Condutividade térmica (W/m.K)	38	Condutividade térmica (W/m.K)	44.5	227		162	
Módulo de elasticidade (GPa)	210	Módulo de elasticidade (GPa)	205	Maior Interferência		Menor Interferência	
Tensão de cedência (MPa)	815	Tensão de cedência (MPa)	731	Pressão de aperto com binário transmissível e força axial (Mpa)		180.7496936	
Tensão de ruptura (MPa)	1010	Tensão de ruptura (MPa)	855				
Rugosidade do cubo da roda (µm)	1.6	Rugosidade do veio (µm)	1.6	Binário de aperto (KN.m)		70.82898618	
Diâmetro exterior da roda (mm)	475	Pressão interna (se existir) (MPa)	0				
Comprimento da montagem (mm)	120	Diâmetro interior do veio (mm)	0				

Figura 4.22 - Folha de cálculo “*Características da montagem*” para a montagem experimental 2.

- Folha de cálculo “*Tensões na montagem*”:

A folha de cálculo apresentada na figura 4.23 fornece os valores das tensões máximas, atingidas no veio e na roda dentada. A tensão máxima atingida no veio, 127,8 MPa, é bastante inferior à tensão admissível do material do veio, 731 MPa, o mesmo acontecendo na roda dentada. Pode-se portanto, garantir a segurança de todo o conjunto.

RODA DENTADA		VEIO OCO			VEIO MACIÇO	
Tensão mínima radial Roda $r=r_{ext}$ (Mpa)	0	Tensão mínima radial veio $r=r_{int}$ (MPa)	0		Tensão radial veio (MPa)	-127.8093341
Tensão máxima radial Roda $r=r_{apert}$ (Mpa)	-127.80933	Tensão máxima radial veio $r=r_{apert}$ (Mpa)	0		Tensão tangencial veio (MPa)	-127.8093341
Tensão equivalente Roda $r=r_{apert}$ (MPa)	279.93672	Tensão tangencial mínima veio $r=r_{apert}$ (Mpa)	0	>paperto	Tensão equivalente veio (MPa)	127.8093341
Tensão tangencial mínima Roda $r=r_{ext}$ (MPa)	24.318048	Tensão tangencial máxima veio $r=r_{int}$ (Mpa)	0	>paperto	Tensão máxima no cubo da roda (MPa)	279.9367164
Tensão tangencial máxima Roda $r=r_{apert}$ (MPa)	152.12738	Tensão equivalente veio $r=r_{apert}$ (Mpa)	0	pint<paperto	Tensão máxima no veio (MPa)	127.8093341
Tensões radiais e tangenciais num dado raio da montagem						
Parâmetros	Roda dentada	Veio maciço		Veio oco		
Tensão radial (MPa)	-95.00425011	-127.8093341		0		
Tensão tangencial (MPa)	119.3222984	-127.8093341		0		
raio considerado (mm)	80	51		51		

Figura 4.23 - Folha de cálculo “*Tensões na montagem*” para a montagem experimental 2.

- Folha de cálculo “*Percentagens de contracção e expansão/Velocidade crítica*”:

Analisando a folha de cálculo (figura 4.24), pode-se observar que a contracção radial do cubo da roda é mais do dobro quando comparada com a dilatação radial do veio. Este resultado é consequência da maior dimensão da roda dentada comparativamente ao veio, originando maiores valores de expansão. A velocidade de rotação crítica também pode ser observada para os diferentes casos de ajustamento.

Contracção/Expansão devido a pressão de aperto	(μm)	% Contracção/expansão em relação ao raio de aperto		
Contracção radial veio para $\delta_{\text{médio}}$	-30.98597026	0.044265672		
Contracção radial veio para $\delta_{\text{máximo}}$	-36.33973971	0.051913914		
Contracção radial veio para $\delta_{\text{mínimo}}$	-25.63220081	0.03661743		
Expansão radial do cubo da roda para $\delta_{\text{médio}}$	63.06402974	0.090091471		
Expansão radial do cubo da roda para $\delta_{\text{máximo}}$	73.96026029	0.105657515		
Expansão radial do cubo da roda para $\delta_{\text{mínimo}}$	52.16779919	0.074525427		
Velocidade Crítica para:	$\delta_{\text{máximo}}$	$\delta_{\text{mínimo}}$	$\delta_{\text{médio}}$	
ω (rad/s)	965.8914781	815.9675975	894.0775882	
ω (rpm)	9223.584194	7791.916593	8537.812061	

Figura 4.24 - Folha de cálculo “*Percentagens de contracção e expansão/Velocidade crítica*” para a montagem experimental 2.

- Folha de cálculo “*Temperaturas de arrefecimento e aquecimento*”:

A folha de cálculo representada (figura 4.25) indica os valores das temperaturas de arrefecimento do veio bem como as temperaturas de aquecimento do cubo da roda. Alterou-se novamente a temperatura possível de se atingir na folha de cálculo para -55°C como se pode observar na figura 4.25 com contorno a vermelho. Esta alteração deve-se essencialmente às trocas de calor existentes entre o veio e o meio ambiente originando uma temperatura no veio (imediatamente antes da montagem) superior à temperatura a que este se encontrava quando mergulhado em gelo seco.

Dados para Aquecimento / Arrefecimento para:	Interferência média	Interferência máxima	Interferência mínima
Interferência pretendida (m)	0.00019450	0.00022700	0.00016200
Coefficiente de dilatação térmica do cubo da roda (por °C)	1.12E-05	1.12E-05	1.12E-05
Coefficiente de dilatação térmica veio (por °C)	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05
Temperatura ambiente (°C)	22	22	22
Só arrefecimento (°C)	-90.95005807	-109.8234611	-72.07665505
Só aquecimento (°C)	146.0433673	166.7704082	125.3163265
Temperatura possível de atingir para arrefecimento veio (°C)	-55	-55	-55
Raio de aperto (m)	0.07	0.07	0.07
Arrefecimento e Aquecimento			
Temperatura de arrefecimento do veio (°C)	-55	-55	-55
Contracção veio devido ao arrefecimento (m) (diametral)	-0.000132594	-0.000132594	-0.000132594
Diferença restante (m) (diametral)	0.00006191	0.00009441	0.00002941
Temperatura de aquecimento restante do cubo da roda (°C)	61.48086735	82.20790816	40.75382653
% Contracção veio devido ao arrefecimento (m) (diametral)	-0.09471	-0.09471	-0.09471
% Expansão cubo da roda devido ao arrefecimento (m) (diametral)	0.044218571	0.067432857	0.021004286
Procedimento			
Aquecer cubo da roda também		Aquecer cubo da roda também	Aquecer cubo da roda também

Figura 4.25 - Folha de cálculo “*Temperaturas de arrefecimento e aquecimento*” para a montagem experimental 2.

Analisando agora a folha de cálculo (figura 4.25) e comparando-a com os dados relativos à montagem experimental 2 pode-se visualizar que a temperatura do cubo da roda imediatamente antes da montagem (50°C), encontra-se compreendida no intervalo de temperaturas aconselhadas pela aplicação informática, 61.5°C para interferência média e 41°C para interferência mínima. Esta observação contrasta com o ocorrido para a montagem experimental 1, em que a temperatura do cubo da roda imediatamente antes da montagem estava compreendida entre os valores de temperatura definidos para situações de interferência média e máxima. Esta diferença de “localização” da temperatura do cubo de roda registada pode explicar a necessidade de se ter recorrido a uma prensa hidráulica de modo a completar a montagem.

A razão pela qual a temperatura registada no cubo de roda não foi superior à registada pode dever-se a 2 factores:

- A roda dentada não esteve tempo suficiente na máquina de lavar-peças industrial, impossibilitando o aquecimento desejado da roda dentada.
- O tempo decorrido desde a saída do cubo da roda da máquina de lavar-peças até ao início da montagem foi elevado, permitindo grandes perdas de calor e por conseguinte redução da temperatura.

Assim, e após a análise de ambas as montagens experimentais realizadas pode-se definir a temperatura de arrefecimento possível de se atingir como sendo -55°C (no caso de arrefecimento do veio em gelo seco) na folha de cálculo “*Temperaturas de arrefecimento e aquecimento*”. Definida a temperatura de arrefecimento, a aplicação informática calculará as temperaturas de aquecimento do cubo da roda para os diferentes tipos de ajustamentos definidos. A temperatura a que se terá de aquecer o cubo

da roda deve-se situar no intervalo compreendido para as situações de interferência média e máxima. Por exemplo, para a montagem experimental 2, a temperatura aconselhada de aquecimento do cubo da roda seria na ordem dos 70°C.

5 Conclusões

As conclusões da presente dissertação encontram-se sintetizadas neste capítulo.

A montagem por interferência por aquecimento/arrefecimento dos componentes é aconselhável para situações em que a velocidade de rotação e/ou o momento de rotação transmitidos sejam elevados.

Elaborou-se um procedimento eficaz para a realização de uma operação de montagem por interferência.

Aplicou-se o procedimento elaborado em duas montagens realizadas na unidade fabril da SEW-EURODRIVE PORTUGAL na Mealhada, verificando-se a viabilidade do mesmo.

Comprovou-se que a utilização da interferência média nos cálculos relativos à montagem se revela uma boa aproximação.

Aconselhou-se o aquecimento/arrefecimento dos componentes a temperaturas contidas no intervalo de temperaturas dado na folha de cálculo “temperaturas de aquecimento/arrefecimento”.

Desenvolveu-se uma aplicação informática (folha de cálculo) eficaz que poderá ser utilizada pelos engenheiros e operários da SEW-EURODRIVE PORTUGAL na Mealhada caso assim o entendam. A temperatura de aquecimento do cubo da roda deve estar compreendida no intervalo de temperaturas definido para as situações de interferência máxima e de interferência média (devido a perdas de calor).

Bibliografia

- [1]. SEW Eurodrive, Redutores e moto-redutores - Manual de instruções, Ed. 07/2006.
- [2]. Bini, E., Rabello, I., Pugliesi, M. (1975) Tolerâncias, Rolamentos e Engrenagens, Ed. Hemus, Brasil.
- [3]. Manfè, G., Pozza, R., Scarato, G. Desenho técnico mecânico, Ed. Hemus.
- [4]. Sottomayor, Prof. A. (2002) Transmissão e movimento de rotação, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [5]. Félez, J., Martínez, M. (1998) Dibujo Industrial, Ed. Sintesis, Madrid.
- [6]. Moura Branco, C., Martins Ferreira, J., Domingos da Costa, J., Silva Ribeiro, A. (2005) Projecto de Órgãos de Máquinas, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian.
- [7]. Lewis, S. J., Hossain, S., Booker, J. D., Truman, C. E., Stuhr, U. (2009) Measurement of Torsionally Induced Shear Stresses in Shrink-Fit Assemblies. *Experimental Mechanics*. 49 637-651.
- [8]. Pedersen, P. (2005). On Shrink Fit Analysis and Design. *Computational Mechanics*. 37 121-130.
- [9]. Sogalad, I., Subramanya Udupa, N.G. (2009). Influence of cryogenic treatment on load bearing ability of interference fitted assemblies. *Materials and Design*. 31 564-569.
- [10]. Ramamoorthy, B., Radhakrishnan, V. (1994) A study of the surface deformations in press and shrink fitted assemblies. *Wear*. 173 75-83.
- [11]. Kim, H. Y., Kim, C., Bae, W. B., Han, S. M. (2007) Development of optimization technique of warm shrink fitting process for automotive transmission parts (3D FE analysis). *Journal of Materials Processing Technology*. 187-188 458-462.
- [12]. Budynas's, R., Nisbett's, K. (2006) Shigley's Mechanical Engineering Design, Ed. McGraw-Hill, 8th edition.
- [13]. Kim, T. J., Kim, H. Y., Hwang, B. C., Kang, H. J., Kim, C. (2009) Improved method for analyzing automotive transmission parts (shaft/gear) manufactured using the warm shrink fitting process. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 10, No. 5, pp. 611-618
- [14]. Shigley, Mischke & Budynas. *Machine Design Tutorial 4-17: Press and Shrink fits*.
- [15]. Sales Palma, Prof. Dr. Eng. E. (2006) Metrologia: Sistemas de tolerâncias e ajustes, PUC Minas.
- [16]. Venkateswara Rao, P., Ramammoorthy, B., Radhakrishnan, V. (1993) Effect of plating and temperature in the strength of shrink fitted assemblies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 33, No. 3, pp. 475-48.
- [17]. Truman, C. E., Booker, J. D. (2007) Analysis of a shrink-fit failure on a gear hub/shaft assembly. *Engineering Failure Analysis*. 14 557-572.
- [18]. Hamrock, B., Jacobson, B., Schmid, S. (1999) *Fundamentals of Machine Elements*, Ed. McGraw-Hill.
- [19]. <http://www.billzilla.org/crweld.jpg>, (20/06/11)
- [20]. Timings, Roger. (2006). *Newnes Mechanical Engineer's Pocket Book*, Ed. Elsevier, 3ª edição.
- [21]. (2005) Engrenagens – Conceitos básicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Brasil.
- [22]. Henriot, G. (2003). Engrenages: détermination des charges sur les dentures et calculs de résistance, *Techniques de l'Ingénieur. Génie mécanique*, BM 5 623
- [23]. Melconian, S. *Elementos de máquinas*, Ed. Érica, 6ª edição.
- [24]. Sun, M. Y., Lu, S. P., Li, D. Z., Li, Y. Y., Lang, X. G., Wang, S. Q. (2010) Three-dimensional finite element method simulation and optimization of shrink fitting process for a large marine crankshaft. *Materials and Design*. 31 4155-4164.
- [25]. Moura Branco, C. (2006) *Mecânica dos Materiais*, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 4ª edição.
- [26]. ISO 286-1:2010 Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits.
- [27]. ISO 286-2:2010 Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts.

- [28]. Callister, W. (2007) Materials Science and Engineering, Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA, 7th edition.
- [29]. Yang, G. M., Coquille, J. C., Fontaine, J. F., Lambertin, M. (2001) Influence of roughness on characteristics of tight interference fit of a shaft and a hub. International Journal of Solids and Structures. 38 7691-7701
- [30]. Wegst, C. W. (1995) Verlag Stahlschlüssel Wegst GMBH
- [31]. <http://www.metalravne.com/selector/steels/ct781.html>, (12/05/11)
- [32]. Spittel, Thilo., Spittel, Marlen. (2009) Landolt-Börnstein – Group VIII Advanced Materials and Technologies, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Vol. 2, Subvol. C, Part 1, Ed. Springer (Germany)
- [33]. <http://buau.com.au/english/files/4340.pdf>, (04/05/11)
- [34]. <http://www.sten.fi/data/attachments/42CrMo4.pdf>, (07/05/11)
- [35]. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=129aba095dd64413981fd979ed2ee6b1>, (04/04/11)
- [36]. http://www.atequip.com/fluke_ti20_thermal_imager.html, (03/05/11).
- [37]. <http://www.fluke.com/fluke/usen/Discontinued-Products/Fluke-65.htm?PID=56099>, (03/05/11)
- [38]. <http://www.fluke.com/fluke/usen/Thermal-Imaging/Fluke-Ti20.htm?PID=56180>, (03/05/11)
- [39]. http://www.myflukestore.com/p1279/fluke_65.php, (03/05/11)
- [40]. <http://www.interlloy.com.au/our-products/case-hardening-steels/x4317-case-hardening-steel/>, (12/05/11)
- [41]. http://www.corusnz.com/downloads/CaseHard_17CrNiMo6.pdf, (15/05/11)
- [42]. <http://www.sten.fi/data/attachments/18CrNiMo7-6.pdf>, (15/05/11)
- [43]. http://www.globalmetals.com.au/_pdf/Hollow_Bar/Hollow_Bar_20MnV6.pdf, (16/05/11)
- [44]. <http://www.interlloy.com.au/our-products/hollow-bar/20mnv6-hollow-bar/>, (16/05/11)
- [45]. http://www.tube-jung.de/html_en/range_body.html, (18/05/11)
- [46]. http://www.pinhol.pt/fotos/editor2/tubo_mecanico_mecaplus.pdf, (19/05/11)
- [47]. http://www.doerrenberg.de/fileadmin/template/doerrenberg/stahl/DatenblaetterEng/1.6582_en.pdf, (10/05/11)
- [48]. <http://www.metalravne.com/selector/steels/VCNMO150.html>, (11/05/11)
- [49]. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b0f23fe4fbb844f5a3e71cfa0e31f513&ckck=1>, (10/05/11)
- [50]. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7b75475aa1bc41618788f63c6500d36b>, (10/05/11)
- [51]. <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=aisi%204140%20steel%20normalized%20air%20cooled>, (10/05/11)
- [52]. <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=aisi%204140%20oil%20quenched%20round%20quench%20temp>, (10/05/11)
- [53]. http://www.saarstahl.de/fileadmin/saarstahl_extranet/images/04_produkte/walzstahlsorten/english/7225_7227_42CrMo4_42CrMoS4.pdf, (07/05/11)
- [54]. http://www.globalmetals.com.au/_pdf/Cromax/Cromax_42CrMo4_4140.pdf, (07/05/11)
- [55]. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fd1b43a97a8a44129b32b9de0d7d6c1a>, (21/05/11)
- [56]. <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=aisi%204340%20normalized>, (21/05/11)
- [57]. <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=aisi%204340%20oil%20quenched%20temper%20round>, (21/05/11)
- [58]. http://www.aspectdemo.com/hillfoot/sites/default/files/817M40_1.5_Nickel-Chromium-Molybdenum_Through_Hardening_Steel_Hillfoot_Multi_Metals.pdf, (21/05/11)
- [59]. Sales Palma, Prof. Dr. Eng. E. (2006) Metrologia: Tolerâncias de acabamento superficial – Rugosidade, PUC Minas

Anexo A- Exemplos de máquinas correspondentes a cada classe de choques

[22]

Tipos de motores	
Choques uniformes	• Motores eléctricos de binário reduzido, turbinas, motores hidráulicos
Choques ligeiros	• Turbinas ou motores eléctricos de binário elevado
Choques moderados	• Motores de combustão interna com grande número de cilindros
Choques fortes	• Motores com reduzido número de cilindros
Tipos de mecanismos accionados	
Choques uniformes	• Geradores, transportadores de correias com carga uniformemente distribuída, máquinas ferramenta, bombas centrífugas ligeiras, misturadores de líquidos ou de matérias homogéneas, ventiladores
Choques ligeiros	• Transportadores de correias com carga não uniformemente distribuída, gruas, ventiladores pesados, bombas centrífugas pesadas, misturadores de matérias não homogéneas, bombas com múltiplos pistões.
Choques moderados	• Extrusoras, misturadores de matérias plásticas, engrenagens de elevadores, bombas com um simples pistão, laminadoras de esferas.
Choques fortes	• Engrenagens de escavadoras, laminadoras de barras pesadas, laminadoras de minerais, bombas de pesada alimentação, laminadoras a frio.

Anexo B - Propriedades mecânicas dos materiais

B1 - Propriedades mecânicas do aço 17CrNiMo6≈18CrNiMo7-6

d - diâmetro externo (mm)	Tratamento térmico	Dureza HB (Brinell)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
11	1	350-415	835	1180-1420
30		320-385	785	1080-1320
63		290-375	685	980-1270
≤16	2			min 1200
16 <d ≤40				min 1100
40 <d ≤ 100				min 900
16	3		900	1100-1300
16 <d ≤40			750	1000-1200
40 <d ≤100			650	900-1100
100 <d ≤160			550	800-950
25	4	380	1050	1295
50		340	950	1160
100		300	815	1010
11	5	410	830	1180-1430
30		370	780	1080-1330
63		345	690	980-1280

Tratamentos térmicos do aço 17CrNiMo6≈18CrNiMo7-6 consoante a fonte:

1 - Temperado e revenido [40].

2 - Endurecido e revenido [31].

3 - Sem tratamento [30].

4 - Temperado e revenido [41].

5 - Temperado - Temperado em óleo até 820 °C ±10°C [42].

B2 - Propriedades mecânicas do aço 20MnV6

e - espessura (mm)	Tratamento térmico	Dureza HB (Brinell)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
<30	1		430	550
<40			420	550
<50			410	550
<70			400	550
<16	2	180	470	620
<25			460	610
>25			430-400	550
<20	3	220	650	750
<25			620	700
<30			570	650
25	4		min 470	650-800
<12	5		470	580-780
12 ≤ e < 20			450	
20 ≤ e < 35			420	
35 ≤ e < 50			400	
<12	6		430	550-720
12 ≤ e < 20			420	
20 ≤ e < 35			400	
35 ≤ e < 50			390	
50 ≤ e < 65			380	490-640
65 ≤ e < 80			360	

Tratamentos térmicos do aço 20MnV6 consoante a fonte:

1 - Sem tratamento [43].

2 - Laminado a quente [44].

3 - Temperado e revenido [44].

4 - Laminado a quente [45].

5 - Laminado a quente [46].

6 - Normalizado [46].

B3 - Propriedades mecânicas do aço 34CrNiMo6

d – diâmetro externo (mm)	e - espessura (mm)	Tratamento térmico	Dureza HB (Brinell)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
≤ 16	≤ 8	1		min 1000	1200-1400
$16 < d \leq 40$	$8 < d \leq 20$			min 900	1100-1300
$40 < d \leq 100$	$20 < d \leq 60$			min 800	1000-1200
$100 < d \leq 160$	$60 < d \leq 100$			min 700	900-1100
$160 < d \leq 250$	$100 < d \leq 160$			min 600	800-950
≤ 16		2		980	1180-1380
$16 < d \leq 40$				885	1080-1280
$40 < d \leq 100$				785	980-1180
$100 < d \leq 160$				685	880-1080
$160 < d \leq 250$				590	780-930
120		3	240	690	790
		4	320	975	1100

Tratamentos térmicos do aço 34CrNiMo6 consoante a fonte:

1-Temperado e revenido [47].

2-Temperado e revenido [48].

3-Revenido e endurecido – Revenido (a 700 °C) [49].

4-Revenido e endurecido – Revenido (a 500 °C) [49].

B4 - Propriedades mecânicas do aço 42CrMo4≈42CrMo5-04

d – diâmetro externo (mm)	e - espessura (mm)	Tratamento térmico	Dureza HB (Brinell)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
25		1	197	415	655
13		2	302	675	1020
25			302	655	1020
50			285	635	972
100			241	485	814
13		3	341	1110	1185
25			311	986	1075
50			285	800	965
100			277	685	883
13		4	321	1025	1090
25			285	931	965
50			262	710	883
100			235	600	807
13		5	277	889	938
25			269	841	917
50			241	675	841
100			229	580	772

Tratamentos térmicos do aço 42CrMo4≈42CrMo5-04 consoante a fonte:

1 - Recozido [50]

2 - Normalizado [51].

3 - Temperado e revenido (a 540 °C) [52].

4 - Temperado e revenido (a 595 °C) [52].

5 - Temperado e revenido (a 650 °C) [52].

Propriedades mecânicas do aço 42CrMo4≈42CrMo5-04 (continuação)

d – diâmetro externo (mm)	e - espessura (mm)	Tratamento térmico	Dureza HB (Brinell)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
≤16	≤8	6		min 900	1100-1300
16 <d ≤40	8 <d ≤20			min 750	1000-1200
40 <d ≤100	20 <d ≤60			min 650	900-1100
100 <d ≤160	60 <d ≤100			min 550	800-950
160 <d ≤250	100 <d ≤160			min 500	750-900
≤40		7	295-355	750	1000-1200
40 <d ≤95			265-325	650	900-1100
>95			235-295	550	800-950
≤16		8		900	1100-1300
16 <d ≤40				750	1000-1200
40 <d ≤100				650	900-1100
100 <d ≤160				550	800-950
160 <d ≤250				500	750-900
250 <d ≤500				460	690-840
500 <d ≤750				390	590-740

Tratamentos térmicos do aço 42CrMo4≈42CrMo5-04 consoante a fonte:

6 - Temperado e revenido [53].

7 - Temperado e revenido [54].

8 - Endurecido e revenido [34].

B5 - Propriedades mecânicas 40CrNiMo6≈42CrNiMo6

d – diâmetro externo (mm)	Tratamento térmico	Dureza HB (Brinell)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
25	1	217	470	745
13	2	388	972	1448
25		363	862	1282
50		341	786	1220
100		321	710	1110
13	3	363	1165	1255
25		352	1145	1207
50		341	1103	1172
100		331	1000	1138
13	4	331	1117	1145
25		331	1096	1138
50		293	958	1014
100		269	786	924
13	5	285	938	1000
25		277	883	958
50		269	834	931
100		255	731	855
≤250	6	248-302	650	850-1000

Tratamentos térmicos do aço 40CrNiMo6≈42CrNiMo6 consoante a fonte:

1 – Recozido [55].

2 – Normalizado [56].

3 - Temperado e revenido (a 540 °C) [57].

4 - Temperado e revenido (a 595 °C) [57].

5 - Temperado e revenido (a 650 °C) [57].

6 - Temperado e revenido [58].

Anexo C- Característica da rugosidade média, [59]

Classe da Rugosidade	Rugosidade média R_a (μm)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,03